



UNIVERSIDAD LAICA "ELOY ALFARO" DE MANABÍ
EXTENSIÓN EN EL CARMEN
CARRERA DE INGENIERÍA DE SOFTWARE
Creada Ley No. 10 – Registro Oficial 313 de noviembre 13 de 1985

PROYECTO INTEGRADOR
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO DE
SOFTWARE

ARQUITECTURA CLIENTE-SERVIDOR CON
MICROCONTROLADOR IOT PARA EL MONITOREO AMBIENTAL
DEL CULTIVO DE THEOBROMA CACAO EN EL VIVERO
LASTENIA VERA ULEAM EL CARMEN

LOPEZ LOOR BRYAN DAVID
AUTOR

ARÉVALO HERMIDA RÓMULO DANILO
TUTOR

EL CARMEN, AGOSTO 2026



CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Extensión El Carmen de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante **LOPEZ LOOR BRYAN DAVID**, legalmente matriculado en la carrera de Software, período académico 2026-2027, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es **"ARQUITECTURA CLIENTE-SERVIDOR CON MICROCONTROLADOR IOT PARA EL MONITOREO AMBIENTAL DEL CULTIVO DE THEOBROMA CACAO EN EL VIVERO LASTENIA ULEAM EL CARMEN"**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

El Carmen, 2 de julio de 2026.

Lo certifico,



Ing. Danilo Arévalo Hermida
Docente Tutor
Área: Software

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
Extensión El Carmen
Carrera de Ingeniería de Software

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Título de Trabajo de Titulación: ARQUITECTURA CLIENTE-SERVIDOR CON MICROCONTROLADOR IOT PARA EL MONITOREO AMBIENTAL DEL CULTIVO DE THEOBROMA CACAO EN EL VIVERO LASTENIA VERA ULEAM EL CARMEN

Modalidad: Proyecto integrador

Autor: López Loor Bryan David

Tutor: Ing. Árevalo Hermida Rómulo Danilo, Mg

Tribunal de sustentación:

- **Presidente:** A.S. Minaya Macías Renelmo Wladimir, Mg

- **Miembro:** Ing. Reasco Pinchao Raúl Saed, Mg

- **Miembro:** Ing. López Rodríguez Carlos Vinicio, Mg

Fecha de sustentación:

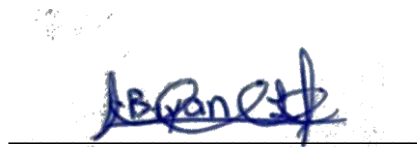
26 de agosto de 2026

UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ
EXTENSIÓN EN EL CARMEN



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La responsabilidad del contenido de este Trabajo de titulación, cuyo tema es: Arquitectura cliente-servidor con microcontrolador IoT para el monitoreo ambiental del cultivo de Theobroma cacao en el Vivero Lastenia Uleam El Carmen, corresponde exclusivamente a: Lopez Loor Bryan David con CI. 2300547748, y los derechos patrimoniales de la misma corresponden a la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.



Lopez Loor Bryan David

C.I. 2300547748

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por brindarme vida, fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar esta importante etapa de mi formación profesional. A mis padres y a mi familia, por su amor, apoyo incondicional, esfuerzo y confianza permanente durante todo este proceso académico. A mis docentes y a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con sus conocimientos, orientación y motivación para el desarrollo de este proyecto.

Bryan David López Loor

AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento a Dios, por concederme vida, salud, fortaleza y sabiduría para culminar esta importante etapa de mi formación profesional. Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi familia, quienes, con su apoyo incondicional, esfuerzo, confianza y consejos han sido el pilar fundamental en el desarrollo de mi vida académica y personal. Gracias a su respaldo constante he podido superar las dificultades y alcanzar esta meta.

Manifiesto mi sincero agradecimiento a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Extensión El Carmen, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y por facilitar los espacios y recursos necesarios para la ejecución de este trabajo de titulación. De manera especial, agradezco a mi tutor del proyecto, Ing. Rómulo Danilo Arévalo Hermida, Mg., por su orientación, acompañamiento, conocimientos y valiosas observaciones durante el desarrollo de la presente investigación. Su guía fue fundamental para fortalecer el contenido técnico y metodológico de este trabajo.

Bryan David López Loor

ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	I
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	IV
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XXI
ÍNDICE DE ANEXOS	XXIII
RESUMEN	XXIV
ABSTRACT.....	XXV
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Presentación del tema.....	2
1.3 Ubicación y contextualización de la problemática.....	2
1.4 Planteamiento del problema	4
1.4.1 Problematización.....	4
1.4.2 Génesis del problema.....	5
1.4.3 Estado actual del problema	6
1.5 Diagrama causa – efecto del problema	7
1.6 Objetivos	7

1.6.1	Objetivo general.....	7
1.6.2	Objetivos específicos	8
1.7	Justificación.....	8
1.8	Impactos esperados	9
1.8.1	Impacto tecnológico.....	9
1.8.2	Impacto social	9
1.8.3	Impacto ecológico.....	9
CAPÍTULO II		11
2	MARCO TEÓRICO.....	11
2.1	Antecedentes históricos.....	11
2.1.1	Historia de sistemas informáticos para sincronización de datos ambientales....	11
2.2	Antecedentes de investigaciones relacionadas al tema presentado	12
2.3	Definiciones conceptuales.....	14
2.3.1	Arquitectura cliente servidor.....	14
2.3.1.1	¿Qué son los Dispositivos IoT?.....	14
2.3.1.1.1	<i>Características de los dispositivos IoT.</i>	15
2.3.1.1.2	<i>Arquitectura de los dispositivos Iot.</i>	16
2.3.2	Tecnología LoRa.....	16
2.3.2.1	Diferencia entre LoRa y LoRaWAN.	18
2.3.2.2	Enlace punto a punto.	18
2.3.2.3	Factor de dispersión (Spreading Factor).....	19
2.3.2.3.1	<i>Potencia de transmisión y consumo.</i>	19
2.3.2.3.2	<i>Comandos AT.</i>	20
2.3.2.4	Calidad del enlace, RSSI.	21
2.3.2.4.1	<i>Calidad del enlace, SNR.</i>	21

2.3.2.4.2	Arquitectura cliente-servidor en la comunicación.....	22
2.3.2.5	Arquitectura IoT.	24
2.3.2.6	Comunicaciones en IoT.....	25
2.3.2.6.1	Protocolo HTTP sobre Wi-Fi.....	26
2.3.3	Monitoreo ambiental.....	27
2.3.3.1	Gestión ambiental del cultivo de cacao.	28
2.3.3.2	Gestión del recurso hídrico en cacaotales.....	29
2.3.3.3	Manejo sostenible del suelo y fertilización.	30
2.3.3.4	Control integrado de plagas y enfermedades.....	31
2.3.3.5	Gestión de residuos y biomasa en plantaciones.....	32
2.3.3.6	Conservación de biodiversidad en sistemas cacaoteros.	33
2.3.3.7	Prevención de deforestación y conservación de cobertura boscosa.	34
2.3.3.8	Manejo ambiental de agroquímicos en el cultivo de cacao.	35
2.3.4	Metodología de desarrollo Scrum.....	36
2.4	Conclusiones del marco teórico	38
CAPÍTULO III.....		40
3	MARCO INVESTIGATIVO	40
3.1	Introducción	40
3.2	Tipos de investigación.....	41
3.2.1	Investigación Aplicada.....	41
3.2.2	Investigación de Campo.....	41
3.2.3	Investigación Descriptiva.....	42
3.3	Métodos de investigación.....	43
3.3.1	Método Analítico	43
3.3.2	Método Sintético.....	43

3.4	Fuentes de información de datos	44
3.4.1	Encuestas.....	44
3.4.2	Entrevista	45
3.5	Estrategia operacional para la recolección de datos.....	45
3.5.1	Población.....	45
3.5.2	Muestra	46
3.5.3	Análisis de las herramientas de recolección de datos a utilizar	47
3.5.3.1	Encuesta.....	47
3.5.3.2	Entrevista.....	47
3.5.4	Estructura de los instrumentos de recolección de datos aplicados	47
3.5.4.1	Estructura de encuesta.	47
3.5.4.2	Estructura de entrevista.	48
3.5.5	Plan de recolección de datos	48
3.6	Análisis y presentación de resultados.....	49
3.6.1	Presentación y descripción de los resultados obtenidos	49
3.6.1.1	Análisis de encuesta realizada a estudiantes de la carrera de Agropecuaria de la Uleam Extensión El Carmen.....	49
3.6.1.2	Análisis de entrevista realizada a Coordinador del Vivero Lastenia Vera.	52
3.6.2	Informe final del análisis de los datos.....	55
CAPÍTULO IV.....		58
4	MARCO PROPOSITIVO	58
4.1	Introducción	58
4.2	Descripción de la propuesta	59
4.3	Determinación de recursos	59
4.3.1	Humanos	59

4.3.2	Tecnológicos.....	60
4.3.3	Económicos.....	61
4.4	Desarrollo del sistema bajo la metodología SCRUM	61
4.4.1	Descripción del producto	62
4.4.1.1	Propósito del producto.....	62
4.4.1.2	Funcionalidades Clave.....	62
4.4.1.3	Usuarios Objetivo.....	63
4.4.1.4	Condiciones de Éxito del Producto.	63
4.4.2	Requerimientos del sistema	63
4.4.2.1	Historias de Usuario.	63
4.4.2.1.1	<i>Historia de Usuario 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.</i>	63
4.4.2.1.2	<i>Historia de Usuario 2: Empaquetado y parseo de la trama en el Gateway.</i>	64
4.4.2.1.3	<i>Historia de Usuario 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP.....</i>	64
4.4.2.1.4	<i>Historia de Usuario 4: Transporte seguro y autenticado de la trama....</i>	65
4.4.2.1.5	<i>Historia de Usuario 5: Verificación de recepción y calidad del enlace.</i>	65
4.4.2.2	Requerimientos funcionales.	66
4.4.2.3	Requerimientos no funcionales.	67
4.4.3	Diseño del sistema	67
4.4.3.1	Casos de uso.	67
4.4.3.1.1	<i>Caso de uso: Entrada de datos a la capa de comunicación.</i>	67
4.4.3.1.2	<i>Caso de uso: Procesamiento en el Gateway.</i>	68
4.4.3.1.3	<i>Caso de uso: Salida de datos hacia el servidor.</i>	68
4.4.3.2	Diagramas de secuencia.....	69

4.4.3.2.1	<i>Diagrama de secuencia: Transmisión de la trama de la estación al servidor.</i>	69
4.4.3.2.2	<i>Diagrama de secuencia: Control de fallos en la comunicación de red. ..</i>	69
4.4.3.2.3	<i>Diagrama de secuencia: Configuración inicial del gateway y el enlace.</i>	70
4.4.3.3	Diagramas de Estado.	70
4.4.3.3.1	<i>Diagrama de estado: Trama en la capa de comunicación.</i>	70
4.4.3.4	Diagrama de Base de Datos.	71
4.4.4	Arquitectura del sistema	71
4.4.4.1	Arquitectura general.	71
4.4.4.2	Tecnologías utilizadas.	72
4.4.5	Roles Scrum	72
4.4.6	Definición de Hecho (DoD).....	73
4.4.6.1	Criterios generales.	73
4.4.6.2	Criterios Específicos del Proyecto.....	74
4.4.7	Product Backlog.....	74
4.4.8	Sprint 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto	75
4.4.8.1	Planificación del Sprint.	75
4.4.8.2	Sprint Backlog: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.	76
4.4.8.3	Desarrollo del Sprint.....	76
4.4.8.3.1	<i>Funcionalidad de Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.....</i>	76
4.4.8.4	Sprint Review.	77
4.4.8.4.1	<i>Sprint 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.</i>	77
4.4.8.5	Pruebas de Sprint.	78
4.4.8.5.1	<i>Pruebas de Caja Negra.</i>	78
4.4.8.5.2	<i>Pruebas de Caja Blanca.....</i>	79

4.4.8.6	Incremento y Entregables del Sprint.	80
4.4.8.7	Estado actual del Producto Backlog.	80
4.4.9	Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway	81
4.4.9.1	Planificación del Sprint.	81
4.4.9.2	Sprint Backlog: Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway.	82
4.4.9.3	Desarrollo del Sprint.....	82
4.4.9.3.1	<i>Funcionalidad de Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway. ...</i>	82
4.4.9.4	Sprint Review.	83
4.4.9.4.1	<i>Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway.....</i>	83
4.4.9.5	Pruebas de Sprint.	85
4.4.9.5.1	<i>Pruebas de Caja Negra.</i>	85
4.4.9.5.2	<i>Pruebas de Caja Blanca.....</i>	85
4.4.9.6	Incremento y Entregables del Sprint.	86
4.4.9.7	Estado actual del Product Backlog.	86
4.4.9.8	Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP.....	87
4.4.9.9	Planificación del Sprint.	87
4.4.9.10	Sprint Backlog: Reenvío de los datos al servidor por HTTP	88
4.4.9.11	Desarrollo del Sprint.....	88
4.4.9.11.1	<i>Funcionalidad de Reenvío de los datos al servidor por HTTP.</i>	88
4.4.9.12	Sprint Review.	89
4.4.9.12.1	<i>Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP.</i>	89
4.4.9.13	Pruebas del Sprint.....	91
4.4.9.13.1	<i>Pruebas de Caja Negra.</i>	91
4.4.9.13.2	<i>Pruebas de Caja Blanca.....</i>	91
4.4.9.14	Incremento y Entregables del Sprint.	92

4.4.9.15	Estado actual del Product Backlog	92
4.4.9.16	Sprint 4: Transporte seguro y autenticado de la trama.	93
4.4.9.16.1	<i>Planificación del Sprint.</i>	93
4.4.9.17	Sprint Backlog: Transporte seguro y autenticado de la trama.	94
4.4.9.18	Desarrollo del Sprint.	94
4.4.9.18.1	<i>Funcionalidad de Transporte seguro y autenticado de la trama.</i>	94
4.4.9.19	Sprint Review.	95
4.4.9.19.1	<i>Sprint 4: Transporte seguro y autenticado de la trama.</i>	95
4.4.9.20	Pruebas del Sprint.	97
4.4.9.20.1	<i>Pruebas de Caja Negra.</i>	97
4.4.9.20.2	<i>Pruebas de Caja Blanca</i>	97
4.4.9.21	Incremento y Entregables del Sprint.	98
4.4.9.22	Estado actual del Product Backlog.	98
4.4.9.23	Sprint 5: Verificación de recepción y calidad del enlace.	99
4.4.9.23.1	<i>Planificación del Sprint.</i>	99
4.4.9.24	Sprint Backlog: Verificación de recepción de datos.	100
4.4.9.25	Desarrollo del Sprint.	100
4.4.9.25.1	<i>Funcionalidad de verificación de recepción de datos.</i>	100
4.4.9.26	Sprint Review.	101
4.4.9.26.1	<i>Sprint 5: Verificación de recepción de datos.</i>	101
4.4.9.27	Pruebas del Sprint.	102
4.4.9.27.1	<i>Pruebas de Caja Negra.</i>	102
4.4.9.27.2	<i>Pruebas de Caja Blanca.</i>	103
4.4.9.28	Incremento y Entregables del Sprint.	103
4.4.9.29	Estado actual del Producto Backlog.	104

4.4.9.30	Resultado Final del Producto.....	104
4.4.9.30.1	<i>Funcionalidades implementadas.</i>	104
4.4.9.31	Evidencia final del sistema.	106
4.4.9.31.1	<i>Autodetección de la velocidad de comunicación.</i>	106
4.4.9.31.2	<i>Configuración automática del módulo LoRa.</i>	107
4.4.9.31.3	<i>Envío de la trama de datos hacia el Gateway.</i>	107
4.4.9.31.4	<i>Validación de respuesta del módulo.</i>	108
4.4.9.31.5	<i>Recuperación automática ante reinicio inesperado.</i>	108
4.4.9.32	Conclusiones del desarrollo,.....	109
CAPÍTULO V		110
5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	110
5.1	Introducción	110
5.2	Presentación y monitoreo de resultados	110
5.2.1	Planificación de la evaluación	110
5.2.2	Ejecución del monitoreo	111
5.2.2.1	Proceso 1: Establecimiento del enlace LoRa.....	111
5.2.2.1.1	<i>Descripción.</i>	111
5.2.2.1.2	<i>Toma de datos.</i>	112
5.2.2.2	Proceso 2 Reenvío al servidor por HTTP.....	113
5.2.2.2.1	<i>Descripción.</i>	113
5.2.2.2.2	<i>Toma de datos.</i>	113
5.2.2.3	Proceso 3: Calidad del enlace (RSSI y SNR).	114
5.2.2.3.1	<i>Descripción</i>	114
5.2.2.3.2	<i>Toma de datos.</i>	114
5.3	Interpretación objetiva.....	115

CAPÍTULO VI.....	118
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
6.1 Conclusiones	118
6.2 Recomendaciones.....	119
BIBLIOGRAFÍA	120
ANEXOS	125
GLOSARIO	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de recolección de datos	48
Tabla 2 Análisis de Encuesta	49
Tabla 3 Análisis de entrevista	52
Tabla 4 Recursos humanos	59
Tabla 5 Recursos tecnológicos.....	60
Tabla 6 Recursos económicos.....	61
Tabla 7 Usuario objetivos	63
Tabla 8 Historia de Usuario 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto	63
Tabla 9 Historia de Usuario 2: Empaquetado y parseo de la trama en el gateway	64
Tabla 10 Historia de Usuario 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP	64
Tabla 11 Historia de Usuario 4: Transporte seguro y autenticación de la trama	65
Tabla 12 Historia de Usuario 5: Verificación de recepción y calidad del enlace	65
Tabla 13 Tecnologías utilizadas.....	72
Tabla 14 Roles del Scrum	72
Tabla 15 Product Backlog.....	74
Tabla 16 Sprint 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto	75
Tabla 17 Producto Backlog1.....	76
Tabla 18 Pruebas de caja blanca Sprint 1	78
Tabla 19 Pruebas de caja negra Sprint 1	79
Tabla 20 Estado actual de Product Backlog1	80

Tabla 21 Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway	81
Tabla 22 Sprint Backlog2	82
Tabla 23 Pruebas de Caja Blanca Empaquetado y parseo en la trama en el gateway	85
Tabla 24 Pruebas de Caja Negra Empaquetado y parseo en la trama en el gateway	85
Tabla 25 Estado actual del Product Backlog2	86
Tabla 26 Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP	87
Tabla 27 Sprint Backlog 3	88
Tabla 28 Pruebas de Caja Blanca: Reenvío de los datos al servidor por HTTP	91
Tabla 29 Pruebas de Caja Blanca Reenvío de los datos al servidor por HTTP	91
Tabla 30 Estado actual del Product Backlog3	92
Tabla 31 Sprint 4: Transporte y autenticación de la trama	93
Tabla 32 Sprint Backlog 4	94
Tabla 33 Pruebas de Caja Negra Transporte seguro y autenticación de la trama	97
Tabla 34 Pruebas de Caja Blanca Transporte y autenticación de la trama	97
Tabla 35 Estado actual del Product Backlog4	98
Tabla 36 Sprint 5: Verificación de repetición y calidad del enlace	99
Tabla 37 Sprint backlog5	100
Tabla 38 Pruebas de Caja Negra Transporte seguro y autenticación de la trama	102
Tabla 39 Pruebas de Caja Blanca Transporte seguro y autenticación de la trama	103
Tabla 40 Estado actual Product Backlog 5	104
Tabla 41 Planificación de la Evaluación.....	110

Tabla 42 Ejecución de la recepción de tramas	112
Tabla 43 Ejecución del reenvío al servidor por HTTP	113
Tabla 44 Ejecución de la medición de calidad del enlace	114

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Árbol del problema	7
Ilustración 2 Diagrama de Entrada: Entrada de datos a la capa de comunicación	67
Ilustración 3 Diagrama de Proceso: en el gateway	68
Ilustración 4 Diagrama de Salida: Salida hacia el servidor	68
Ilustración 5 Diagrama de secuencia: Transmisión en la trama de la estación al servidor	69
Ilustración 6 Diagrama de secuencia: Control de fallos en la comunicación de red	69
Ilustración 7 Diagrama de secuencia: Configuración inicial del gateway y el enlace	70
Ilustración 8 Diagrama de estado: Trama en la capa de comunicación	70
Ilustración 9 Diagrama de la base de Datos	71
Ilustración 10 Diagrama de Arquitectura general	71
Ilustración 11 Montaje de la estación y el gateway con sus módulos LoRa	77
Ilustración 12 Configuración de los módulos LoRa	78
Ilustración 13 Procesamiento del sobre de datos en el Gateway	83
Ilustración 14 Sobre de datos reconstruido en el gateway	84
Ilustración 15 Petición HTTP con la clave de autenticación	89
Ilustración 16 Portal de configuración de la red WiFi del Gateway	90
Ilustración 17 Transporte seguro y autenticado de la trama	95
Ilustración 18 Clave de autenticación adjunta a la petición	96
Ilustración 19 Reintento de envío tras un fallo de transmisión	101
Ilustración 20 Algoritmo de parseo y extracción de trama	101

Ilustración 21 Autodetección de la velocidad de comunicación.....	106
Ilustración 22 Configuración automática del módulo LoRa.....	107
Ilustración 23 Transmisión de la trama de datos hacia el gateway.....	107
Ilustración 24 Validación de la respuesta del módulo LoRa	108
Ilustración 25 Recuperación automática ante reinicio inesperado.....	108
Ilustración 26 Arranque y configuración del enlace LoRa	111
Ilustración 27 Respuesta HTTP 200 del servidor	113
Ilustración 28 Valores de RSSI y SNR en el Gateway	114

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Asignación de tutor	125
Anexo B: Reporte del sistema antiplagio.....	126
Anexo C: Fotografías.....	127
Anexo D: Evidencia de aplicación de encuesta	128
Anexo E: Evidencia de aplicación de entrevista.....	129

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general diseñar e implementar un sistema automatizado de monitoreo ambiental basado en Internet de las Cosas (IoT) para mejorar el control hídrico en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) del Vivero Lastenia de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. La problemática abordada se relaciona con el estrés hídrico ocasionado por las variaciones microclimáticas, las cuales inciden de manera negativa en el desarrollo inicial de las plantas y limitan la toma de decisiones oportunas respecto al riego. La investigación consideró como población a un total de 90 personas vinculadas con el vivero: 89 estudiantes de la carrera de Agropecuaria que realizan prácticas en él y el coordinador del vivero, debido al tamaño reducido y accesible de la población estudiantil, se realizó un estudio censal, considerando a la totalidad de los 89 estudiantes, sin aplicar una fórmula estadística para la determinación de una muestra. Para la recolección de información se emplearon técnicas de observación directa, entrevista y encuesta, orientadas a identificar las condiciones reales del entorno y las necesidades del proceso de monitoreo. La propuesta consistió en el desarrollo de una arquitectura IoT compuesta por nodos sensores con microcontroladores ESP32, sensores de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, junto con mecanismos de comunicación basados en LoRa/LoRaWAN, Wi-Fi y protocolos MQTT/HTTP para la transmisión y visualización de datos en un panel de control. Los resultados obtenidos en las pruebas del capítulo 6 demostraron una captación confiable de las variables ambientales, estabilidad en el envío de datos a larga distancia y adecuada respuesta del sistema ante las condiciones del entorno. En conclusión, la solución implementada fortalece el monitoreo hídrico, reduce la incertidumbre en la gestión del riego y contribuye al desarrollo de una agricultura de precisión eficiente y sostenible.

ABSTRACT

The general objective of this research was to design and implement an automated environmental monitoring system based on the Internet of Things (IoT) to improve water control in the cocoa crop (*Theobroma cacao*) at the Lastenia Nursery of the Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. The problem addressed relates to the water stress caused by microclimatic variations, which negatively affect the early development of the plants and limit timely decision-making regarding irrigation. The research considered as its population a total of 89 people linked to the nursery: 88 students from the Agricultural program who carry out practical work there, and the nursery coordinator; from this population, a representative sample of 72 students was selected through probabilistic sampling, with a 95% confidence level and a 5% margin of error. To collect the information, direct observation, interview, and survey techniques were used, aimed at identifying the real conditions of the environment and the needs of the monitoring process. The proposal consisted of the development of an IoT architecture composed of sensor nodes with ESP32 microcontrollers, temperature, relative humidity, and soil moisture sensors, together with communication mechanisms based on LoRa/LoRaWAN, Wi-Fi, and MQTT/HTTP protocols for the transmission and visualization of data on a control panel. The results obtained in the tests of chapter 6 demonstrated reliable capture of the environmental variables, stability in the transmission of data over long distances, and an adequate response of the system to the conditions of the environment. In conclusion, the implemented solution strengthens water monitoring, reduces uncertainty in irrigation management, and contributes to the development of efficient and sustainable precision agriculture.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El proceso de optimización en el cultivo del *Theobroma cacao*, mediante la aplicación de tecnologías IoT, implicó la supervisión en tiempo real de diversas variables ambientales que influyeron directamente en el desarrollo y la salud de las plantas. En este proyecto se emplearon sensores para captar y analizar parámetros como la temperatura, la humedad del suelo y la luminosidad, seleccionados por su relevancia en el crecimiento y la calidad del cacao en el vivero Lastenia de la ULEAM.

Para mantener los procesos fisiológicos del cultivo de cacao en su estado óptimo, se consideró crucial la variable de temperatura. Se vio que cambios importantes podían tener un impacto en el metabolismo de las plantas y en la calidad final de los granos, lo que causaba peligros de estrés térmico y de brote de enfermedades. La emisión de alertas tempranas fue posible gracias al registro constante a través de dispositivos IoT, lo cual posibilitó la adopción de medidas preventivas encaminadas a proteger el bienestar del cultivo.

La cantidad de agua que fue necesaria para el cacao estaba determinada por la humedad que poseía el suelo, lo cual influyó la fotosíntesis y el crecimiento de las raíces y al automatizar la supervisión de esta variable se evitaron tanto el exceso como la escasez de agua. Esto permitió gestionar adecuadamente el riego y minimizar la pérdida del agua. Las mediciones en tiempo real desde los datos significativos sirvieron para corroborar las decisiones agronómicas planteadas con anterioridad.

Se determinó que la luz influye en la energía necesaria para el desarrollo de las plantas y en la fotosíntesis. Las fluctuaciones de este factor fueron provocadas por la sombra, las variaciones del clima y los cambios en las estaciones. La vigilancia continua ayudó a identificar

zonas con poca exposición y a ajustar el diseño del vivero, lo que resultó en un aumento en la producción de cacao.

La integración de sensores de IoT en el modelo cliente-servidor logró unificar el registro, la transmisión y el análisis de las distintas variables ambientales detectadas. Dicha solución promovió el análisis de datos en conjunto y la creación de alertas automatizadas que permitieron un manejo eficaz y sostenible de la explotación agraria. Conjuntas las variables de la luminosidad, la humedad y la temperatura se conseguiría un ambiente ideal para las plantas, se disminuiría la intervención manual y se fomentaría un incremento de la productividad en unas condiciones que son fácilmente controlables y verificables.

Este método integral, que se basa en IoT, ayudó a identificar anomalías a tiempo, mejoró la utilización de recursos y colaboró con el fortalecimiento de la sostenibilidad en la agricultura. Estos componentes fueron determinantes para mejorar la calidad y la competitividad del cacao producido en esa zona.

1.2 Presentación del tema

El presente proyecto aborda el desarrollo de una arquitectura cliente-servidor con microcontroladores IoT para el monitoreo ambiental del cultivo de *Theobroma cacao* en el Vivero Lastenia Vera de la ULEAM Extensión El Carmen. La propuesta integra microcontroladores ESP32, sensores ambientales y comunicación mediante tecnología LoRa, con el propósito de recopilar y transmitir datos relacionados con las condiciones del cultivo. La arquitectura establece la comunicación entre una estación de campo, un gateway y un servidor, permitiendo el transporte y procesamiento de las mediciones ambientales obtenidas durante el monitoreo.

1.3 Ubicación y contextualización de la problemática

El vivero Lastenia perteneciente a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) está situado en Ecuador, específicamente en el cantón El Carmen en la calle Pedro

Tobías Zambrano y la Avenida Chone Km 33. El vivero se encuentra en el lugar donde antes estaba el Colegio Lastenia Vera Pinargote que fue establecido en 1986 y donado a la comunidad por Pedro Tobías Zambrano Vera, un hombre de negocios. Después de años de labor educativa la ULEAM tomó el control del terreno y lo dedicó a proyectos agro productivos entre los cuales se encuentra el vivero de cacao. La universidad volvió a abrir su campus en noviembre de 2024 después de un tiempo sin actividad, reafirmando así su orientación hacia la investigación agrícola regional.

El cantón El Carmen se ha fortalecido como una zona con potencialidad para la agricultura de cacao y de plátano. No obstante, en el vivero Lastenia existen limitantes relevantes a la producción de *Theobroma cacao* debido a la ausencia de estaciones meteorológicas que permitan el registro de datos climáticos en tiempo real. Como consecuencia de que los agricultores y los técnicos recurren a métodos empíricos para tomar decisiones fundamentales, ya sea para prevenir plagas, el manejo del riego o el control de humedad, esta carencia resulta problemática para la planificación de la agricultura. Esto afecta de manera directa el rendimiento y la calidad del cultivo.

Asimismo, se aprecia que las tecnologías IoT y los sistemas embebidos se utilizan poco porque no hay suficiente conocimiento técnico especializado. Esto dificulta la automatización de la supervisión medioambiental de variables clave, tales como la humedad del suelo y la temperatura. Esto perpetúa prácticas ineficaces y aumenta el peligro de pérdidas económicas. No solamente se solucionarían los problemas de esta manera, sino que además la ULEAM se convertiría en un modelo a seguir en agricultura de precisión dentro de la provincia si se implementara una arquitectura cliente-servidor con microcontroladores IoT.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Problematicación

La actividad agrícola actual se debe sustentar en información precisa y contextualizada sobre los conocimientos que se producen continuamente sobre las modificaciones sufridas por el clima sobre todo en el cantón El Carmen, donde los cambios drásticos en las condiciones climáticas han hecho que puedan surgir enfermedades fúngicas en las plantaciones de cacao y esto perjudica a los pequeños campesinos quienes deben decidir con base en lo aprendido a lo largo de los años y muchas veces esas decisiones producen pérdidas monetarias pues no son capaces de anticiparse de manera efectiva a los problemas ni gestionar los recursos agrícolas de forma adecuada.

En el vivero Lastenia de la ULEAM, se identificaron los siguientes inconvenientes principales relacionados con la producción:

- La carencia de datos automatizados acerca de la situación ambiental complica la anticipación de fenómenos como olas de calor, sequías, lluvias abundantes y cambios en la intensidad de la luz, todos factores esenciales para el adecuado crecimiento del cacao.
- La propagación de plagas y enfermedades fúngicas, como la broca del cacao y la moniliasis, que hallan condiciones propicias en entornos cálidos y húmedos, ocasiona una disminución considerable de la calidad y cantidad producida de mazorcas.
- Limitación en la gestión efectiva de los recursos, que provoca un despilfarro de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios a causa del desconocimiento acerca de las verdaderas necesidades de la producción agrícola.
- La falta de información oportuna para el control y la toma de decisiones en la agricultura ha hecho que se recurra a métodos basados en la experiencia, lo que resulta en que los agricultores enfrenten riesgos que se podrían evitar y reduzcan sus beneficios.

A raíz de este contexto resulta necesario plantearse las siguientes interrogantes como:

¿Qué efectos genera el desconocimiento de las variables climáticas en la producción de cacao?

¿Por qué los agricultores continúan dependiendo de decisiones empíricas?

¿De qué manera pueden minimizarse los costos y las pérdidas en el cultivo y la producción mediante el uso de tecnologías adecuadas?

Las cuestiones planteadas anteriormente ponen de manifiesto las limitaciones existentes en el seguimiento de las condiciones ambientales del cultivo, lo que dificulta disponer de información oportuna para la toma de decisiones, la gestión de los riesgos asociados a las variaciones climáticas y el manejo adecuado de la producción agrícola en el cantón El Carmen.

1.4.2 Génesis del problema

El cultivo de cacao en El Carmen ha mostrado un aumento en los problemas agronómicos a lo largo de los últimos años, sobre todo desde 2015. Esto se debe a cambios climáticos drásticos, como la inconstancia de las lluvias y el incremento de las temperaturas. Estas circunstancias fueron particularmente favorables para la moniliasis, una enfermedad fúngica. La temperatura y la humedad más altas que dominaron en la última década aumentaron notablemente su incidencia en el área.

La situación se debió, en gran medida, a la degradación del cambio climático, que impactó negativamente la calidad y el rendimiento de los granos de cacao. La falta de sistemas automatizados para el monitoreo ambiental obligó a los pequeños productores a tomar decisiones empíricas, lo que afectó de manera negativa la gestión adecuada de recursos y el control fitosanitario de las cosechas. Simultáneamente, los agricultores se vieron sometidos a la presión de la demanda internacional de cacao y de requerir estándares de calidad más elevados en el mercado mundial; por lo tanto, debieron implementar procedimientos agrícolas más eficaces y soluciones tecnificadas.

En resumen, desde mediados de la década anterior, el incremento continuo de las temperaturas, la variación en el patrón de lluvias y la propagación de enfermedades por hongos han generado un ambiente más vulnerable para los cultivos de cacao en El Carmen. Esta problemática se ha intensificado debido a las variaciones climáticas y a la continuidad de prácticas tradicionales que limitan el seguimiento oportuno de las condiciones ambientales del cultivo.

1.4.3 Estado actual del problema

Actualmente, en el Vivero Lastenia Vera de la ULEAM Extensión El Carmen, el monitoreo de las condiciones ambientales del cultivo de *Theobroma cacao* presenta limitaciones debido a que no se dispone de un sistema automatizado que permita registrar y consultar continuamente las variables ambientales. El seguimiento de las condiciones del cultivo depende principalmente de observaciones y controles realizados de forma manual, lo que dificulta disponer de información actualizada para identificar oportunamente cambios en el entorno.

Esta situación limita el control de variables como la temperatura, la humedad relativa y la humedad del suelo, especialmente ante las variaciones climáticas que se presentan en el vivero. Asimismo, la falta de comunicación automatizada entre sensores, una unidad de procesamiento y un servidor impide centralizar y transmitir las mediciones ambientales para su consulta remota. Como consecuencia, existe una limitada disponibilidad de datos en tiempo real que apoyen la toma de decisiones relacionadas con el manejo del cultivo y, particularmente, con las necesidades hídricas de las plantas de *Theobroma cacao*.

1.5 Diagrama causa – efecto del problema

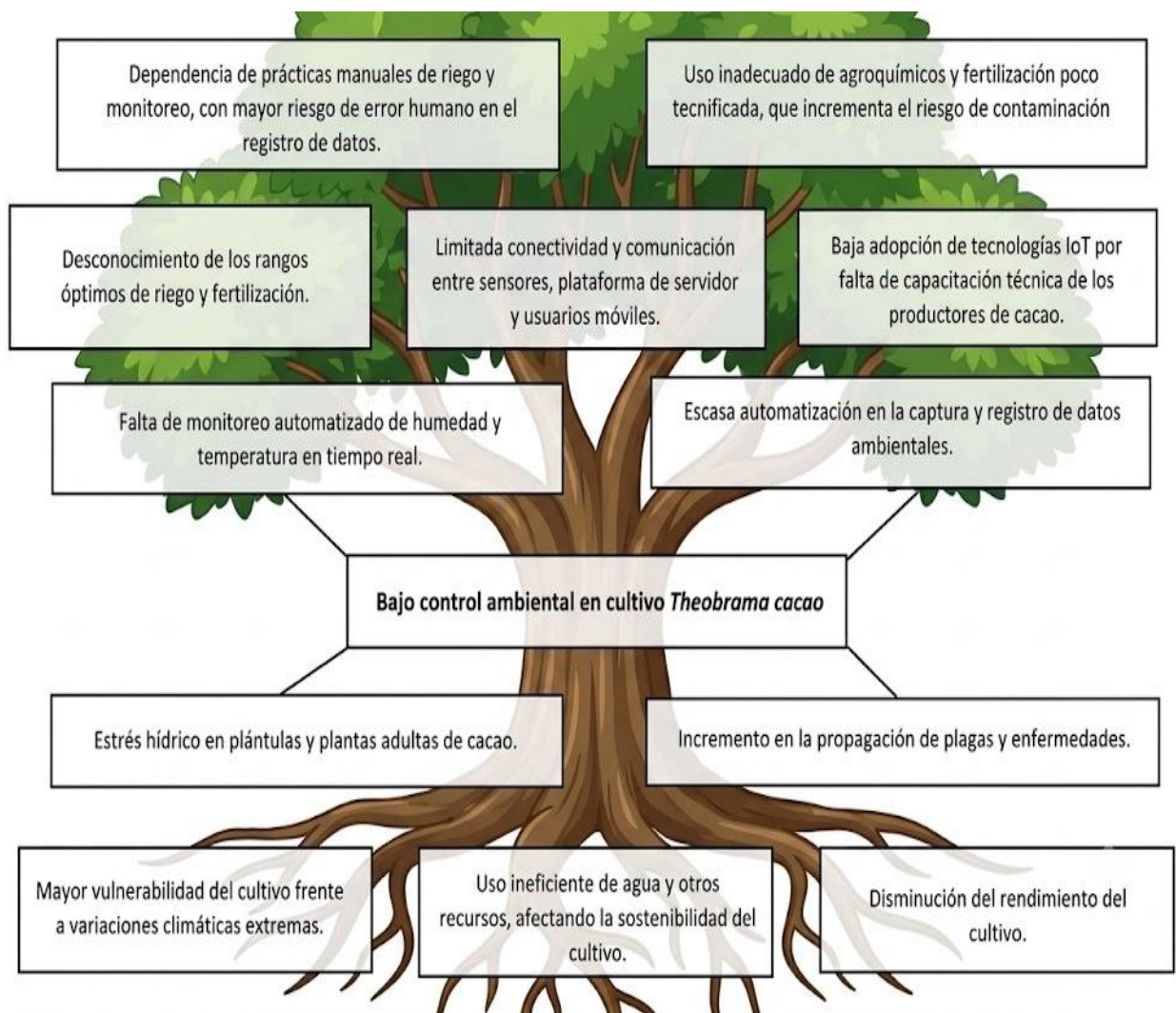


Ilustración 1: Árbol del problema

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Implementar una arquitectura de comunicación cliente-servidor basada en microcontroladores ESP32 y un enlace LoRa punto a punto, que permita transportar de forma confiable las mediciones ambientales desde la estación de campo hasta el servidor y la aplicación móvil, en el cultivo de *Theobroma cacao* del Vivero Lastenia de la ULEAM Extensión El Carmen.

1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar los motivos y las consecuencias más significativas de la ausencia de supervisión ambiental en la producción de cacao en el campus Lastenia, identificando los elementos fundamentales que afectan la sostenibilidad agrícola y la eficiencia en la producción.
- Estudiar teorías y tecnologías de Internet de las Cosas que se usan en el seguimiento agrícola por medio de una revisión bibliográfica de fuentes especializadas, con el propósito de establecer los fundamentos del diseño del sistema automatizado para monitorear el ambiente en cultivos de Theobroma cacao.
- Implementar el circuito de adquisición de datos y el sistema para almacenar y visualizar, utilizando sensores que se conectan a un microcontrolador; Asimismo, desarrollar la aplicación móvil cliente que sea capaz de recibir, observar y guardar los datos ambientales en tiempo real.
- Estudiar el funcionamiento y los resultados del sistema de monitoreo ambiental automatizado, mediante la revisión de los datos recolectados y pruebas realizadas en el terreno, con la finalidad de establecer su efectividad en la gestión del cultivo de Theobroma cacao.

1.7 Justificación

La puesta en marcha de este sistema brinda beneficios esenciales para la evolución agrícola de las Lastenia Vera. La digitalización y automatización de la recolección de datos permite que los estudiantes, docentes y agricultores tengan acceso instantáneo a información meteorológica importante, como la humedad, temperatura, radiación solar y las precipitaciones. Esto hace más fácil tomar decisiones con mayor precisión, optimizando el empleo de fertilizantes y agua y minimizando las pérdidas causadas por enfermedades y plagas.

Asimismo, el sistema favorece a toda la comunidad de universidades y técnicos que están relacionados con la producción del cacao. Fomenta la implementación de prácticas agrícolas adecuadas, el empleo eficaz de los recursos naturales y la supervisión remota de las

condiciones medioambientales. La posibilidad de acceder a los datos desde la aplicación móvil permite que usuarios de diferentes perfiles potencien la calidad del cacao cosechado y la sostenibilidad de las plantaciones, así como también aumenten la productividad.

1.8 Impactos esperados

1.8.1 Impacto tecnológico

Este sistema tiene como objetivo, mediante la integración eficaz de hardware y software, optimizar la gestión agrícola. El monitoreo en tiempo real y la recopilación automática de datos se ven potenciados al añadir sensores ambientales y microcontroladores conectados a través del Internet de las Cosas (IoT), lo cual significa un progreso importante en comparación con los métodos manuales o tradicionales. Esta solución tecnológica promueve el avance de habilidades en la utilización de instrumentos innovadores entre los alumnos, técnicos y usuarios del campus, lo que ayuda a digitalizar los procesos productivos y a llevar una gestión agrícola más precisa, moderna y sostenible.

1.8.2 Impacto social

La repercusión de este sistema en la sociedad está enfocada, sobre todo, en los granjeros del campus y su área circundante. Los agricultores tienen la posibilidad de tomar decisiones más acertadas en el manejo del riego, control de plagas y fertilización si disponen de información detallada y actualizada sobre las condiciones ambientales y climáticas de sus cultivos. Como resultado, los cultivos son más productivos y saludables. Acceder a esta tecnología mejora las condiciones de trabajo, disminuye las pérdidas económicas y hace más sostenible la actividad, lo cual ayuda a aumentar el bienestar y la calidad de vida en los hogares agrícolas comunitarios.

1.8.3 Impacto ecológico

La habilidad de este sistema para propiciar prácticas agrícolas ambientalmente sostenibles en la cosecha del cacao constituye la razón de la huella ecológica. Como resultado

de una correcta aportación de datos de las variables ambientales que permita que los agricultores reduzcan el uso excesivo de fertilizantes, pesticidas y agua puede ocurrir una reducción de la contaminación de los cuerpos hídricos y la tierra. La supervisión inteligente y la automatización ayudan a conservar la flora y la fauna y a proteger los ecosistemas autóctonos para contribuir a la buena gestión de nuestros recursos naturales y a la equilibrada relación del campus y su entorno.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes históricos

El concepto de variable en programación nace con los primeros lenguajes de alto nivel en la década de 1950, permitiendo almacenar y manipular datos dinámicos dentro de un programa (Paredes y Torres, 2021). Las variables son cruciales para gestionar la lectura y el control de los sensores y actuadores en el ámbito de la computación embebida y los sistemas IoT. Por ejemplo, en la programación de Arduino y ESP8266, se actualizan constantemente los datos ambientales o de control, como la temperatura, la humedad o el estado de un relé. Estos datos se comunican con servicios en la nube y dispositivos físicos a través de Google Assistant o Alexa (Gómez y Ramírez, 2022).

Las primeras calculadoras del siglo XX constituyeron el origen de los sistemas informáticos que han ido evolucionando, dando lugar a los microcontroladores y microprocesadores presentes en la tecnología actual. Posteriormente, la llegada de las placas tipo Arduino en 2005 permitió la programación de hardware de forma económica mediante el lenguaje C++, lo que contribuyó a democratizar el desarrollo de sistemas embebidos. Más tarde, el módulo ESP8266 (2014) y el siguiente ESP32 (2016) son de bajo coste y se pueden conectar vía redes Wi-Fi lo que permitió impulsar el Internet de las Cosas (IoT). Pastando los anteriores avances también se desarrollan asistentes de voz como Alexa y Google Assistant que facilitan la interacción de voz con sistemas inteligentes basados en la nube y en el Internet de las cosas, así como la gestión de dispositivos conectados (López y Fernández, 2021).

2.1.1 Historia de sistemas informáticos para sincronización de datos ambientales

De acuerdo con Castro y Silva (2022), los primeros sistemas de monitoreo ambiental fueron manuales o mecanizados, pero la evolución hacia sistemas automáticos integrados con IoT ha sido decisiva. El uso de sensores conectados a microcontroladores como Arduino y

ESP8266 ha permitido capturar en tiempo real datos ambientales (temperatura, humedad, calidad del aire) y sincronizarlos vía plataformas en la nube como Firebase. Estas tecnologías posibilitan también la interacción mediante asistentes de voz que extienden la accesibilidad y gestión remota de los datos. Asimismo, para garantizar la privacidad y confiabilidad de la información medioambiental en las ciudades inteligentes y proteger estos sistemas, se ha vuelto esencial el desarrollo de prácticas y protocolos de ciberseguridad (Vargas, 2023).

2.2 Antecedentes de investigaciones relacionadas al tema presentado

La tesis titulada "Implementación de prototipo IoT para la monitorización ambiental y el análisis de calidad del aire en campus universitario" tuvo lugar en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, Ecuador. El objetivo general fue diseñar y desarrollar un sistema que permitiera la medición y análisis en tiempo real de varios parámetros ambientales, temperatura, humedad, radiación ultravioleta y calidad del aire mediante sensores específicos como BME280, LTR390-UV y MQ135 la obtención y transmisión de datos lo lleva a cabo una Raspberry Pi la cual se encuentra linked mediante la plataforma ThingSpeak para la visualización y almacenamiento remoto, entre los resultados que se obtienen cabe destacar un sistema que es funcional y accesible además de proporcionar un monitoreo ambiental continuo que permite generar condiciones ambientales a nivel universitario y sentar las bases para futuras mejoras en gestión ambiental (García, 2024).

La institución responsable del trabajo "Diseño de sistema IoT de monitoreo ambiental para mejorar la seguridad en línea de producción industrial" fue la Universidad de Guayaquil correspondiente al Ecuador. La principal finalidad del trabajo fue diseñar una solución tecnológica que permita ejercer un control en tiempo real en relación a las variables ambientales que son claves para la seguridad de una línea de producción industrial. Para realizar la recolección y sincronización de datos mediante la plataforma ThingSpeak se incorporaron los sensores MQ-7, MQ-135 y DHT11 a la placa ESP32 por lo cual el sistema demostró haber

alcanzado un avance suficiente en cuanto a la automatización y control del entorno de producción pues ofrece la capacidad de poder identificar situaciones de riesgo inminente, lanzar avisos de alerta temprana, mejorar los niveles de seguridad y la operación industrial (Ramírez et al, 2022).

La tesis "Implementación de un sistema IoT para monitoreo en tiempo real basado en LoRaWAN en plataforma cloud" fue realizada en la Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador. El objetivo fue crear un sistema que pueda recoger datos del entorno mediante sensores TTGO-LoRa32 y enviar la información a una plataforma en la nube de AWS utilizando una red LoRaWAN y mostrando los resultados por medio de Grafana. Una adecuada precisión en el proceso de obtención de datos y un correcto rendimiento del sistema en relación con el consumo de energía fueron algunos de los grandes logros alcanzados, lo que lo convirtió en una propuesta viable para la gestión ambiental sostenible en las smart cities, debido a la robustez y escalabilidad de la solución puesta en marcha (Alarcón y Vargas, 2023).

Dichos análisis están muy relacionados con la investigación de las posibilidades actuales del uso de tecnologías Internet of Things para el seguimiento y la organización de variables ambientales con el registro de la obtención y el control remoto de información gracias a protocolos y plataformas en la nube. Sin embargo, el proyecto presentado destaca por considerar posibilitar la interacción mediante asistentes de voz como Alexa o Google Assistant, con la aspiración de introducir una capa más de automatismo y facilidad a las tareas de control y consulta de dispositivos IoT.

Además, presenta un enfoque particular sobre la seguridad del IoT, lo cual es fundamental para garantizar que la información se conserve sin alteraciones en aplicaciones agrícolas y comunitarias. Esto amplía el ámbito de las tesis analizadas y ofrece un valor adicional en cuanto a la capacidad de adaptarse a diversos contextos y crecer.

2.3 Definiciones conceptuales

2.3.1 *Arquitectura cliente servidor*

Un sistema cliente-servidor es la arquitectura de red en la que las distintas responsabilidades de los participantes se distribuyen con este esquema, los servidores son los responsables de facilitar un conjunto de recursos y servicios, y los clientes son los responsables de solicitarlos. En este caso, los clientes producen solicitudes que son respondidas por servidores que procesan la información y devuelven resultados o la ejecución de ciertas funciones. En esta arquitectura se promueve la comunicación ordenada y centralizada, optimizando la gestión de recursos y favoreciendo la escalabilidad de las aplicaciones. Se caracteriza por su capacidad para integrar un conjunto de dispositivos y como tal lo constituye un pilar de tecnologías actuales como el Internet de las Cosas (IoT) ya que tiene sensores o dispositivos embebidos que ocuparían el rol de clientes, mientras que las plataformas en la nube actuarían como servidores (Tanenbaum y Van, 2021).

2.3.1.1 ¿Qué son los Dispositivos IoT?.

Los dispositivos de IoT o Internet de las cosas son elementos cruciales que constituyen al mismo tiempo la revolución tecnológica que forma parte de la posibilidad de que objetos de uso cotidiano se interconecten, esto es que estén conectados entre sí a través de redes informáticas. Estas herramientas son capaces de extraer información del medio exterior mediante sensores, procesarla y enviarla a través de protocolos de red, de modo que pueda ser analizada, monitoreada o bien se pueda llevar a cabo una respuesta automática por parte del mismo dispositivo o de un sistema conectado a él. Los dispositivos de IoT, además, están diseñados para cumplir objetivos determinados, lo que les permite realizar optimizaciones en términos de tamaño, capacidad de procesamiento y consumo energético. Esto los habilita para poder ser utilizados en distintos entornos, como los hogares inteligentes, las industrias agrícolas o las industrias 4.0 (Sinha et al., 2022).

La evolución de IoT ha cambiado el paradigma de monitoreo ambiental de forma continua tomados por los microcontroladores del Arduino y el ESP8266, capaces de captar datos como temperatura, presión atmosférica, humedad, etc., satisfaciendo el requerimiento de tener los datos en la nube y de poder analizarlos automáticamente. Este nuevo paradigma permite desde automatizar las casas hasta fabricar sistemas industriales donde los sensores DHT11 y MQ-2 permiten captar variables ambientales que son conectadas a un Arduino UNO mediante el ESP8266, en donde se pueden compartir con los servicios que proveen aplicaciones como ThingSpeak para guardar y mostrar estos datos en la nube, permitiendo dar respuestas rápidas ante condiciones desfavorables y optimizar la eficiencia en agricultura y manufactura (Al-Sarawi et al., 2021).

2.3.1.1.1 *Características de los dispositivos IoT.*

Uno de los aspectos más importantes de los dispositivos IoT es su capacidad para operar con bajo consumo energético, característica fundamental para garantizar que funcione durante largos periodos sin necesidad de mantenimiento constante o recarga frecuente, especialmente puedan en zonas remotas o de difícil acceso. Además, la miniaturización es otra característica esencial; Estos dispositivos son compactos, permitiendo su integración en objetos cotidianos sin afectar su funcionalidad ni estética. Esto ha sido clave para la adopción masiva en ámbitos diversos como la domótica, ciudades inteligentes y sistemas de agricultura de precisión (Ray y Mukherjee, 2022).

De la misma manera, los dispositivos IoT incorporan una diversidad de actuadores y sensores que les facilitan captar y transformar el ambiente, respectivamente. Los sensores tienen la capacidad de cuantificar variables físicas como la humedad, la temperatura, la presión, los gases o el brillo; por su parte, los actuadores llevan a cabo órdenes como encender un foco, activar una alarma o abrir una válvula. Para que distintos dispositivos y sistemas, incluso de diferentes marcas, puedan colaborar y comunicarse con eficacia en una red IoT, es crucial la

interoperabilidad entre dispositivos a través de protocolos como MQTT y CoAP (Kumar y Sharma, 2021).

2.3.1.1.2 *Arquitectura de los dispositivos Iot.*

Para garantizar un funcionamiento eficaz, la arquitectura de los dispositivos IoT se basa en tres capas esenciales. En primer lugar, está el hardware, que comprende los sensores para recoger datos, los actuadores para interactuar con el ambiente físico y el microprocesador o microcontrolador. En segundo lugar, el software integrado que supervisa el hardware, ejecuta programas concretos y gestiona la comunicación con la red. Finalmente, la capa de conectividad que puede usar tecnologías de comunicación inalámbrica como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee o redes celulares (3G, 4G, 5G), que transmite información hacia plataformas en la nube o servidores (Sethi y Sarangi, 2021).

Para los dispositivos IoT, hay diferentes perspectivas arquitectónicas. Por un lado, algunos funcionan como nodos simples que mandan información a un gateway centralizado; por otro lado, otros llevan a cabo procesamiento local con el fin de disminuir la latencia y el uso de banda ancha, lo cual se denomina edge computing. La eficiencia y escalabilidad de los sistemas IoT pueden optimizarse gracias a esta arquitectura distribuida, lo que hace más sencillo su uso en contextos complejos como la administración energética o el seguimiento ambiental (Zhang et al., 2022).

2.3.2 *Tecnología LoRa*

LoRa, abreviatura de Long Range, es una técnica de modulación inalámbrica diseñada para redes de área extensa y bajo consumo (LPWAN), optimizada para comunicaciones de largo alcance con muy poco gasto de energía, lo que la hace idónea para aplicaciones del Internet de las Cosas (Sinha et al., 2022). Su capacidad para transmitir pequeñas cantidades de datos a distancias de varios kilómetros con bajo consumo la distingue de tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth, cuyo alcance es mucho menor y cuyo gasto energético resulta más elevado.

El fundamento de LoRa es la modulación por ensanchado de espectro mediante chirp (Chirp Spread Spectrum, CSS), en la que cada símbolo se representa por una señal cuya frecuencia varía de forma continua a lo largo del tiempo, ascendiendo o descendiendo dentro del ancho de banda disponible (Martínez y Gómez, 2022). Esta naturaleza de banda ancha permite que la señal se recupere incluso si parte del espectro está afectado por ruido o interferencia, ya que la información se distribuye a lo largo de toda la banda y no se concentra en una sola frecuencia. Por esa razón, el enlace mantiene su fiabilidad en entornos con interferencias, como los que se presentan en zonas rurales y de cultivo.

A cambio de este alcance, LoRa transmite a velocidades bajas, por lo que se emplea para enviar datos pequeños y espaciados, y no para grandes volúmenes de información. Esta característica encaja de forma natural con el monitoreo ambiental, donde las variables medidas como la temperatura y la humedad se representan con pocos datos y se envían en intervalos amplios. En consecuencia, la baja velocidad no constituye una limitación para este tipo de aplicación, mientras que el alcance y el bajo consumo sí aportan un beneficio directo (Morales et al., 2023).

Además de su alcance, LoRa opera en bandas de frecuencia de uso libre, lo que significa que no requiere el pago de licencias ni la contratación de un operador de red para funcionar. Esta condición reduce el costo de despliegue y de operación del sistema, un aspecto relevante en proyectos académicos o de bajo presupuesto como el desarrollado en el vivero. Por todo lo anterior, LoRa se seleccionó como la tecnología del enlace principal entre la estación meteorológica y el gateway, al ofrecer el equilibrio entre alcance, consumo y costo que el proyecto necesita.

2.3.2.1 Diferencia entre LoRa y LoRaWAN.

Es frecuente confundir LoRa con LoRaWAN aun cuando hacen referencia a conceptos diferentes. LoRa hace sólo referencia a la capa física, a la forma en que la señal se desplaza por el aire entre dos dispositivos, mientras que LoRaWAN hace referencia a un protocolo de red que funciona por encima de LoRa en el cual se añade la parte relacionada con los servidores de red, la gestión con varios dispositivos y operadores y cómo se gestionan las comunicaciones en un modo extendido (Sinha et al., 2022).

El trabajo que se presenta aquí utiliza LoRa en su versión más directa, un enlace punto a punto, al margen de la infraestructura de LoRaWAN y por esa razón siempre hace referencia a LoRa punto a punto, y no LoRaWAN, ya que en la aplicación propuesta no se introducen servidores de red y gestión de operadores.

2.3.2.2 Enlace punto a punto.

Un enlace punto a punto es una comunicación directa entre dos dispositivos, sin intermediarios ni infraestructura de red. En este esquema, cada dispositivo posee una dirección propia y ambos comparten un identificador de red común, de modo que solo se comunican entre sí. Diversos estudios han empleado esta topología para caracterizar el desempeño de LoRa en entornos reales, midiendo la calidad del enlace entre un transmisor y un receptor directos (Gómez y Torres, 2022).

En este proyecto, la estación meteorológica y el gateway se comunican de manera directa mediante un enlace punto a punto. Esta modalidad se eligió porque el vivero no dispone de una infraestructura de red de área extensa que justifique el uso de LoRaWAN, y porque el sistema solo necesita comunicar dos puntos: el nodo de campo y el punto de reenvío. El enlace punto a punto reduce la complejidad, elimina la dependencia de operadores externos y resulta suficiente para el volumen y la frecuencia de datos del monitoreo ambiental (Stallings, 2023).

2.3.2.3 Factor de dispersión (Spreading Factor).

El factor de dispersión (SF por sus siglas en inglés) es una variable de modulación LoRa que se puede configurar y que establece el número de chirps utilizados por símbolo. Esta variable determina la tasa de datos, robustez y alcance (Sinha et al., 2022). En la práctica, LoRa permite el ajuste del SF, que puede ir del 7 al 12, los valores altos logran chirps en longitudes largas y obtienen ganancia de procesamiento y sensibilidad, lo que favorece la comunicación a largo alcance, pero con menor velocidad.

La elección del SF depende del tipo de aplicación. En un sistema que transmite datos de pequeño tamaño y no muy frecuente los requerimientos de velocidad no son un problema, por lo que se puede priorizar la robustez de la comunicación. Estudios experimentales indican que el SF influye de forma positiva en la calidad de la señal recibida (Al-Sarawi et al., 2021). En el presente trabajo se configura un SF intermedio-alto, que proporciona un enlace estable y de buen alcance sin maximizar el tiempo de transmisión, lo cual además disminuye el consumo de potencia en cada transmisión.

2.3.2.3.1 Potencia de transmisión y consumo.

La potencia de transmisión es un nuevo parámetro que impacta el alcance y la calidad del enlace, un aumento en la potencia incrementa la intensidad de la señal recibida pero también aumenta el consumo de corriente del módulo durante la transmisión. Experimentos concluyentes sostienen que la potencia de transmisión está correlacionada positivamente con los índices de calidad de la señal, una reducción de potencia causará una reducción en la intensidad recibida, así como la relación señal-ruido (Al-Sarawi et al., 2021).

Así que la configuración de la potencia es un compromiso entre el alcance y la estabilidad de la alimentación. En este proyecto realmente se dio una configuración de potencia de transmisión para tener un valor intermedio, intentando mantener un buen enlace en la

distancia que queríamos alcanzar en el vivero, pero al mismo tiempo evitando picos de corriente que podría hacer reiniciar el módulo por inestabilidad de la alimentación.

2.3.2.3.2 Comandos AT.

Los comandos AT son las instrucciones en formato de texto que permiten configurar y controlar módulos de comunicación a través de puertos serie. Su denominación proviene del prefijo AT de la palabra Attention, que comienza la mayoría de estos comandos, denominación que permanece de los antiguos módems telefónicos a un gran número de módulos de comunicación modernos. Cada comando transmite al módulo una determinada acción y el módulo responde confirmando la ejecución de la acción o informando de la existencia de un error.

Los comandos AT se intercambian según un esquema pregunta-respuesta: el microcontrolador lanza un comando al puerto serie y espera la contestación del módulo antes de continuar. La contestación correcta, representada habitualmente por el texto +OK, confirma la ejecución del comando; una contestación errónea indica que la instrucción no ha podido ser ejecutada. Este esquema permite al programa del microcontrolador comprobar los resultados de cada acción y reaccionar ante ellos, por ejemplo, reintentando un comando para el que no ha llegado respuesta.

En este trabajo, los módulos LoRa son configurados y manejados utilizando comandos AT que son enviados desde el microcontrolador. Por medio de los mismos es posible asignar la dirección de cada nodo, la identificación de la red que es compartida entre la estación y el gateway, configurar los parámetros de la modulación y hacer que se envíen las tramas. De este modo, toda la configuración del enlace se implementa a nivel de software, sin requerir ninguna modificación física del módulo o el uso de herramientas externas.

La utilización de los comandos AT proporciona flexibilidad y control sobre el comportamiento del enlace, ya que cualquier cambio como puede ser por ejemplo cambiar la

potencia de transmisión o la dirección de un nodo se consigue modificando las instrucciones que son enviadas desde el programa. Esta propiedad simplificó las pruebas durante el desarrollo, ya que permitió probar distintas configuraciones del enlace sin necesidad de alterar el hardware. Por tanto, los comandos AT son el mecanismo mediante el cual el microcontrolador controla el módulo LoRa a lo largo del todo el funcionamiento del sistema.

2.3.2.4 Calidad del enlace, RSSI.

El RSSI (Received Signal Strength Indicator) es un indicador de la potencia con la que llega la señal al receptor, medido en decibelios-milivatio (dBm). Es una medida relativa que ayuda a determinar si la señal recibida es lo bastante fuerte para lograr una buena conexión inalámbrica. Su valor se expresa en forma negativa: cuanto más cercano a cero, más fuerte es la señal; los valores muy negativos indican una señal débil. En LoRa, el RSSI suele situarse entre 30 dBm, que representa una señal muy fuerte, y valores cercanos a 120 dBm, que representan una señal débil.

El RSSI depende principalmente de la distancia entre los dispositivos, la potencia de transmisión y la ganancia de las antenas, y disminuye a medida que aumenta la distancia. El gateway mide este valor para cada transmisión que recibe, lo que permite evaluar la calidad del enlace en las condiciones reales de operación.

2.3.2.4.1 Calidad del enlace, SNR.

La SNR o Relación Señal/Ruido es la relación existente entre la potencia de la señal útil y la del ruido de fondo, los cuales se expresan en dB. A diferencia del RSSI que sólo representa la intensidad de la señal recibida, la SNR nos indica lo claro que es la señal respecto al ruido del canal. Valores de SNR altos nos indican que la señal destaca claramente respecto al ruido, mientras que valores muy bajos nos advierten de la proximidad del ruido al nivel de la señal, lo que dificulta su interpretación.

Una propiedad singular de LoRa es la conducta demoduladora de señales por debajo del nivel de ruido (valores de SNR de hasta prácticamente - 20 dB) gracias a su forma de modulación por ensanchado de espectro (Morales et al., 2023). Esta propiedad explica por qué LoRa logra comunicaciones fiables en condiciones en las que otras tecnologías fallarían, y constituye una de las razones de su amplia adopción en aplicaciones de largo alcance. En términos prácticos, significa que el enlace puede seguir funcionando aun cuando la señal recibida sea muy débil.

Los valores típicos de SNR en LoRa se sitúan entre -20 dB y +10 dB; un valor cercano a +10 dB indica que la señal recibida está poco degradada por el ruido y, por tanto, que la comunicación es de buena calidad. Por ello, un enlace que opera con valores de SNR positivos dispone de un amplio margen de seguridad, ya que se encuentra lejos del punto en el que la recepción comenzaría a fallar. Ese margen representa la holgura que tiene el sistema para tolerar mayores distancias, obstáculos o interferencias sin perder la comunicación (Mendoza et al., 2023).

En este proyecto, el SNR se lee en el gateway en el momento de recibir cada trama, junto con el RSSI, con el fin de evaluar la calidad del enlace en las condiciones reales del vivero. La combinación de ambos indicadores ofrece una visión más completa que cualquiera de ellos por separado: mientras el RSSI informa sobre la intensidad de la señal, el SNR informa sobre su claridad frente al ruido. De este modo, la lectura conjunta de RSSI y SNR permite verificar que la comunicación entre la estación y el gateway es estable y confiable.

2.3.2.4.2 *Arquitectura cliente-servidor en la comunicación.*

La arquitectura cliente-servidor es un modelo de comunicación donde las responsabilidades se distribuyen entre dos componentes: el servidor, que proporciona recursos o servicios, y el cliente, que los solicita. De esta forma el cliente genera solicitudes que el servidor debe atender, procesar y responder, favoreciendo una comunicación centrada y

ordenada. Este modelo es el que más se utiliza en los sistemas informáticos en red, basado en su claridad y por la facilidad con que permite administrar desde un actor central los recursos.

Una de las ventajas del modelo de cliente-servidor es la separación clara de funciones que se produce en las partes, favoreciendo el mantenimiento y la escalabilidad del sistema. El servidor puede atender solicitudes de varios clientes, los cuales no necesitan conocerse, ya que cada cliente sólo necesita saber cómo hacer sus solicitudes y como interpretar sus respuestas. Esta independencia de las partes produce un comportamiento robusto del sistema ya que crecimientos o modificaciones del sistema no requieren en general una redefinición completa de la comunicación entre las partes.

En el sistema que se ha implementado, tal modelo se traduce en la parte final del proceso de comunicación, dado que el gateway actúa como un cliente que lanza las peticiones al servidor central, el cual las atiende, las trata y luego confirma su recepción. El gateway no pertenece a la parte de registro o interpretación de las medidas; simplemente, este dispositivo envía al servidor que recibe el dato requerido, mientras que el servidor es quien se encarga de interpretar y almacenar el dato. De esa manera, la relación entre ellos se adecúa exactamente al modelo de cliente-servidor.

Cabe señalar que el proyecto en su conjunto combina esta arquitectura con un enlace punto a punto en su primer tramo, el que va de la estación al gateway. Es decir, la comunicación completa emplea dos esquemas complementarios: un enlace de radio directo para transportar el dato desde el campo, y un modelo cliente-servidor para entregarlo al servidor central. Esta combinación permite aprovechar las ventajas de cada esquema el alcance del enlace punto a punto y la organización centralizada del modelo cliente-servidor en el tramo donde cada uno resulta más conveniente.

2.3.2.5 Arquitectura IoT.

La estructura básica de un sistema basado en el Internet de las Cosas (IoT) está formada por dispositivos físicos, redes de comunicación y plataformas basadas en la nube. La función de esta arquitectura es posibilitar que los datos ambientales sean recolectados, transmitidos y procesados en tiempo real. Sethi y Sarangi (2021), sostiene en su libro sobre Google Assistant para IoT con Arduino y ESP8266 que esta arquitectura se fundamenta en un modelo de cliente-servidor. En este modelo, los dispositivos embebidos (por ejemplo, el ESP8266) actúan como clientes, recogen datos a través de sensores y los envían a servidores en la nube, como Firebase Realtime Database. Estos servidores funcionan como almacenes centrales y administran las interacciones con aplicaciones finales, entre las que se incluyen los asistentes de voz, como Google Assistant. De esta manera, posibilitan la interacción directa y en tiempo real con los dispositivos físicos.

La arquitectura de IoT puede agregar un nivel adicional de lógica en la nube, gracias a servicios como Firebase Functions, dentro del marco de la evolución para Alexa (Sethi y Sarangi, 2021). Estos transforman las instrucciones y eventos que recibe el asistente Alexa en acciones físicas que tienen un impacto en los dispositivos IoT. Esta arquitectura que se puede adaptar posibilita la integración de varios dispositivos, la comunicación simultánea y el control por voz y la automatización inteligente, lo que le proporciona al usuario una experiencia sin interrupciones. La conectividad se sostiene, sobre todo, a través de protocolos estándar inalámbricos, como el Wi-Fi, que son altamente compatibles con los módulos ESP8266.

Nasser et al., (2023) detalla, en su estudio enfocado en la ciberseguridad para ciudades inteligentes, la arquitectura IoT desde una perspectiva segura y escalable. Para ello, divide el sistema en capas: aplicación, servicio, red y dispositivo. Subrayan que la seguridad tiene que aplicarse en cada capa, mediante procedimientos que garanticen la confidencialidad, la integridad y la disponibilidad de los datos ambientales obtenidos en campo. Por otro lado,

resaltan la importancia de las arquitecturas abiertas, que permiten que distintos dispositivos puedan comunicarse entre sí y que faciliten la implementación de soluciones de IoT escalables, desde simples estaciones meteorológicas hasta sistemas avanzados de control para manejar las ciudades.

En conclusión, la arquitectura de IoT se apoya en tres bloques y se desarrolla de forma modular: hardware embebido para control y captura; plataformas de nube para procesar y almacenar datos; y la capa de interacción, que puede incluir aplicaciones móviles y asistentes de voz (Sinha et al., 2022). Esta combinación permite que se den soluciones prácticas y flexibles para la vigilancia medioambiental, la seguridad en las ciudades inteligentes y la domótica, cumpliendo con los estándares y asegurando eficacia, escalabilidad y seguridad.

2.3.2.6 Comunicaciones en IoT.

De acuerdo con Al-Sarawi et al., (2021), las comunicaciones en IoT son el núcleo que posibilita la interacción entre plataformas en la nube y dispositivos embebidos en arquitecturas cliente-servidor. En proyectos que integran Arduino y ESP8266, el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es aplicado fundamentalmente en combinación con Wi-Fi 802.11 b/g/n. En este marco, los microcontroladores asumen el rol de clientes publicadores (publishers): publican datos JSON, provistos por sensores DHT11, sobre tópicos específicos como "/hogar/sala1/temperatura" y suscriben (subscribers) sobre las órdenes de Google Assistant en "/hogar/sala1/control" en forma de tópicos. Este protocolo ligero es soportado por QoS 0, 1 o 2 según la criticidad de la entrega y hace uso de menos de 2 KB de RAM en el ESP8266.

En el marco de Alexa, que las comunicaciones fusionan HTTP/REST y MQTT para conectarse con AWS IoT Core. Para ello, utiliza Firebase Functions como proxy que transforma los mensajes de los asistentes de voz en tópicos MQTT accesibles por medio de ESP8266. Se implementan encabezados de autenticación JWT en cada publicación y reintentos

exponenciales para las desconexiones Wi-Fi, lo que posibilita obtener porcentajes de entrega más altos al 99.5% en ambientes con señal inestable. Esto es esencial para el monitoreo ambiental continuo, ya que la pérdida de datos relacionados con la humedad puede influir en decisiones significativas.

De acuerdo con Morales et al., (2023), para reforzar la seguridad en las comunicaciones de IoT urbanas, se implementan certificados X.509 auto-firmados en ESP8266, se rotan las claves cada 24 horas a través de Firebase Auth y se utiliza cifrado TLS 1.2/1.3 obligatorio en MQTT sobre WiFi.

Para detectar anomalías y lograr una mayor granularidad de accesos, se aconseja segmentar los temas por dispositivo UUID ("/ciudad/manzana1/esp8266-A1B2C3/datos") a través del análisis de patrones de tráfico que identifican inyecciones de datos falsos o ataques DDoS en redes de sensores distribuidos.

Esta combinación de protocolos permite que el flujo de comunicación entre los diferentes componentes del sistema se realice en menos de 300 milisegundos, tal como se representa en el siguiente diagrama de bloques (Delgado y López, 2021).



Ilustración 2: Diagrama de bloques de procesos de comunicación IoT.

2.3.2.6.1 *Protocolo HTTP sobre Wi-Fi.*

El Hypertext Transfer Protocol, que se traduce como protocolo de transferencia de hipertexto es el estándar de la comunicación en el web más extendido, basado en el modelo cliente-servidor que utiliza peticiones y respuestas: un cliente envía la petición a un servidor indicando qué acción desea ejecutar y la información asociada, y el servidor responde con un código que refleja la ejecución o el éxito de la operación. La sencillez y su gran compatibilidad

han hecho que se convierta en un protocolo que no sólo se utiliza en los navegadores, sino también en la comunicación entre servidores, o entre un dispositivo y un servidor.

En el conjunto de una comunicación HTTP, cada petición y cada respuesta deben estructurarse de forma ordenada de acuerdo a la operación solicitada, la información adicional de control y cuando lo requieran, la información del contenido que se desea transmitir. El servidor responde enviando un código numérico que refleje la ejecución o el éxito de la operación, es decir, el recurso existía previamente o bien hay un error. Esta forma estandarizada de comunicarse permite el intercambio de información entre dispositivos de tipo diferente de una manera sistemática.

En el sistema desarrollado, el gateway recibe el dato y lo prepara para la entrega al servidor utilizando una petición HTTP a través de la red Wi-Fi. La petición tiene como parámetro el identificador con el que se identificara el gateway ante el servidor, de modo que este solo acepte datos que provengan de un origen autorizado y prevenga que se puedan incluir sus datos dentro del sistema, y por tanto añade una capa de seguridad ante el envío. Con la recepción de la petición correspondiente, el servidor devuelve el código de respuesta, en el que se informa sobre la aceptación o no de la misma.

Gestión de la respuesta o código devuelto al gateway, en función del código de respuesta que obtenga el gateway actuará de forma diferente en cada caso. Si el servidor devuelve una respuesta en la que acepta el dato, se considerará el envío como correcto; si el código de respuesta indica que el dato ya había sido recibido con anterioridad, se tomará como un caso resuelto y evitará el reenvío innecesario. Así, el protocolo HTTP no se limita simplemente a entregar la información hasta el servidor, sino que también devuelve la respuesta

2.3.3 Monitoreo ambiental.

El seguimiento del medio ambiente es un proceso organizado que implica observar, analizar y medir las condiciones del entorno, incluyendo la evaluación de factores como la

pureza del agua, la atmósfera o el terreno. Su propósito es descubrir alteraciones, detectar problemas potenciales y anticipar condiciones futuras. Este proceso conlleva la recolección constante de datos a través de estaciones y sensores móviles o fijos, que posibilitan el análisis de las tendencias y la valoración del efecto que tienen las actividades humanas sobre los ecosistemas (Paredes y Torres, 2023).

Asimismo, el monitoreo ambiental es esencial para la protección de los recursos naturales y la salud pública, ya que permite tomar decisiones informadas con el fin de mitigar riesgos y preservar la biodiversidad (Sinha et al., 2022). En síntesis, es una herramienta fundamental para el desarrollo responsable de las actividades de producción y la gestión sostenible del medio ambiente (Alarcón y Vargas, 2023).

2.3.3.1 Gestión ambiental del cultivo de cacao.

Se entiende la gestión ambiental de la producción de cacao como un conjunto sistemático de acciones técnicas, productivas y administrativas que tienen como objetivo generar cacao de manera eficaz, rentable y en armonía con el medioambiente. Esta gestión incluye la planificación de las actividades agrícolas, el uso sensato de insumos, la preservación del agua y el suelo, además de la administración responsable de los desechos producidos en cada fase del ciclo productivo, desde que se establece el cultivo hasta después de la cosecha. En esta línea, la gestión ambiental pretende que las decisiones del productor incorporen criterios normativos y ecológicos, con el objetivo de minimizar los efectos negativos de la actividad cacaotera y favorecer la preservación de los ecosistemas en los que se lleva a cabo (Ramírez y Vargas, 2022)

Además, la gestión ambiental del cacao incorpora variables y prácticas específicas que permiten identificar, prevenir, mitigar y compensar los efectos que tienen las labores agrícolas sobre componentes como la biodiversidad, la calidad del agua, la estructura del suelo y la atmósfera. Esto implica evaluar cómo afectan al ambiente actividades como la preparación del

terreno, la fertilización, el control de plagas, el riego y el transporte, con el fin de diseñar estrategias de manejo que disminuyan la erosión, la contaminación y la pérdida de hábitat asociadas al cultivo. A partir de este diagnóstico, se formulan planes y programas de manejo ambiental que definen medidas concretas, cronogramas y responsabilidades para mejorar el desempeño ambiental de las plantaciones de cacao en el corto y largo plazo (Ramírez et al, 2022).

2.3.3.2 Gestión del recurso hídrico en cacaotales.

La gestión del recurso hídrico en cacaotales procura que el agua disponible sea utilizada de manera efectiva y suficiente a la necesidad fisiológica de la planta de cacao, sin causa ninguna pérdida de esta agua ni algún efecto negativo sobre la cuenca. En los sistemas de cultivo de cacao, esta gestión debe adoptar el uso que se hace de la temporalidad de la lluvia, la capacidad de retención de humedad del suelo y algunas prácticas de conservación del agua, como coberturas vegetales y sombreados que tratan de disminuir la pérdida de vapor y mantener la humedad en el perfil del suelo. Una correcta gestión hídrica permite mantener el vigor de las plantas, reducir el estrés hídrico en épocas secas y mantener niveles de producción menos variables a lo largo del año, algo que es fundamental para una sostenibilidad económica y ambiental de los cacaotales (Morales et al., 2022).

En este contexto, se han determinado como métodos eficaces para mejorar la utilización del agua en los cultivos de cacao la aplicación de sistemas de riego tecnificado y la planificación del riego a partir de indicadores del estado hídrico del cultivo. Recomendaciones en cultivos de cacao indican que al aplicar tecnologías de riego eficiente se ahorra agua, se maximiza la distribución de la humedad en el terreno, se disminuye la huella hídrica del cultivo sin restarle rendimiento y adicionalmente, mediante el seguimiento de variables del cultivo como la humedad del suelo, el potencial hídrico de las hojas y los índices de estrés hídrico permiten adaptar adecuadamente los riegos para evitar déficit hídrico o exceso de riego,

situaciones que afectan negativamente en el crecimiento, la floración y el rendimiento de mazorcas en cultivos de cacao (Zambrano et al., 2023).

2.3.3.3 Manejo sostenible del suelo y fertilización.

En la producción de cacao, el uso sostenible del suelo tiene como objetivo preservar la fertilidad, la biodiversidad y la estructura a través del tiempo, evitando procesos de degradación como el empobrecimiento de materia orgánica, la compactación o la erosión. Bajo esta perspectiva, el suelo es visto como un recurso vivo que respalda el sistema productivo. Por lo tanto, la planificación de las tareas agrícolas comprende técnicas como la cobertura continua, emplear barreras vivas y añadir residuos vegetales para conservar la humedad y salvaguardar la capa arable (Castro, 2021).

Estas acciones permiten mejorar la capacidad de infiltración y retención de agua, aumentar la disponibilidad de nutrientes y favorecer la actividad biológica, lo que se traduce en plantas de cacao más sanas y resilientes frente a variaciones climáticas y plagas (Andrade, Sánchez y Vera).

La fertilización en un sistema de cultivo sostenible de cacao combina fuentes orgánicas y fuentes minerales para satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo sin llegar a afectar la calidad del suelo o la de los recursos hídricos que se encuentran relativamente cercanos, es decir, se intenta aportar los nutrientes a las dosis, al momento y a la ubicación adecuados. Para ello se puede hacer uso de los análisis de suelos y de tejidos vegetales que eviten tanto deficiencias como excesos de los nutrientes que pueden llegar a ser responsables de potencial contaminación del agua por lixiviación o escorrentía. La combinación de la aplicación de abonos orgánicos, de enmiendas y la fertilización mineral racionalmente administrada, hace posible restituir aquellos nutrientes extraídos por la cosecha y mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos beneficiando así a la sostenibilidad económica y ambiental de los sistemas cacaoteros en el largo plazo (Castro y Intriago, 2021)

2.3.3.4 Control integrado de plagas y enfermedades.

La estrategia de control integrado de plagas y enfermedades en cacaotales consiste en fusionar métodos culturales, biológicos, mecánicos y químicos con el objetivo de sostener las poblaciones de organismos perjudiciales por debajo del umbral económico, al tiempo que se disminuyen los peligros para la salud humana y el medioambiente. Este enfoque parte de la identificación correcta de las principales plagas e infecciones que afectan al cacao, del conocimiento de sus ciclos de vida y de la relación con factores como clima, manejo del cultivo y presencia de hospederos alternos, de modo que las decisiones de control se tomen de forma planificada y no solo reactiva. En los sistemas cacaoteros, el manejo integrado incluye acciones como podas sanitarias, eliminación oportuna de mazorcas infectadas, regulación del sombrío, manejo adecuado de la densidad de siembra y uso de materiales genéticos tolerantes o resistentes, lo que disminuye la presión de inóculos patógenos y de insectos-plaga en las plantaciones (Vera et al., 2022).

Dentro de los programas de control integrado también se promueve el uso de agentes de control biológico, biopesticidas de origen vegetal y prácticas agroecológicas que favorecen enemigos naturales, reservando el empleo de plaguicidas químicos como última alternativa y bajo criterios técnicos definidos. Diversos manuales fitosanitarios señalan que la selección de productos, dosis, momento y forma de aplicación debe basarse en el monitoreo periódico de la incidencia y severidad de plagas y enfermedades, y en la evaluación de su impacto económico, para evitar tratamientos innecesarios que incrementen costos y generen resistencia en los organismos objetivo. De esta manera, el control integrado de plagas y enfermedades se convierte en un componente clave de la gestión ambiental del cultivo de cacao, al disminuir el uso indiscriminado de agroquímicos, proteger la biodiversidad asociada al agroecosistema y contribuir a la sostenibilidad productiva de los cacaotales en el mediano y largo plazo (Mendoza y Paredes, 2021).

2.3.3.5 Gestión de residuos y biomasa en plantaciones.

En las plantaciones de cacao, la administración de biomasa y residuos se enfoca en el tratamiento planificado de subproductos como son las cáscaras, las ramas podadas, el mucílago y las hojas, para reducir al mínimo los efectos sobre el medio ambiente y hacer uso de su valor productivo. Diversos estudios señalan que, cuando estos residuos se dejan en campo sin control o se queman, pueden incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero, favorecer la proliferación de plagas y enfermedades y generar problemas de contaminación local, por lo que es necesario implementar estrategias de manejo que se alineen con los principios de la economía circular. En este enfoque, los residuos de la producción y beneficio del cacao se consideran una fuente de biomasa con potencial para usos agrícolas, energéticos e industriales, lo que transforma un problema de disposición en una oportunidad para mejorar la sostenibilidad del sistema cacaotero (Mendoza et al., 2022).

La biomasa residual del cacao puede ser empleada en el marco de la administración medioambiental mediante técnicas como la digestión anaerobia, el compostaje y la transformación en productos biológicos. Así, se contribuye a reducir los desechos y a cerrar ciclos de nutrientes. Según estudios recientes, la utilización de cáscaras, cascarillas y otros subproductos para producir biofertilizantes, abonos orgánicos o biocombustibles hace posible reducir el empleo de insumos externos, limitar la producción de residuos y elevar los beneficios de los productores mediante la comercialización de productos secundarios. La puesta en marcha de planes de gestión de residuos en plantaciones cacaoteras, que incluyan indicadores para el reciclaje, la minimización y la revalorización, ha demostrado tener un impacto positivo a nivel medioambiental, social y económico. Esto contribuye al logro de certificaciones de sostenibilidad y a la consecución de metas de desarrollo sostenible en áreas productoras de cacao (Castro y Intriago, 2021).

2.3.3.6 Conservación de biodiversidad en sistemas cacaoteros.

La potencialidad para el mantenimiento de la biodiversidad en sistemas cacaoteros viene determinada por el diseño y el manejo de cacaotales bajo arreglos agroforestales. En ellos, el cacao forma parte de un sistema en el que se asocia a árboles de sombra, especies maderables, frutales y vegetación nativa, en la medida en que constituyen hábitat, recursos y refugio para la fauna y la flora silvestres. Diferentes trabajos demuestran que los sistemas de agroforestería en los cacaotales presentan una mayor diversidad de especies vegetales y animales en comparación con los monocultivos al sol, además, su estructura similar a la del bosque secundario favorece la conectividad del paisaje y permite conservar especies que son sensibles a la deforestación. En estos sistemas, mediante la presencia de estratos vegetales múltiples, hojarasca y microhábitats también se favorece el mantenimiento de comunidades funcionalmente diversas como dispersores de semillas, insectívoros o polinizadores, considerados como grupos funcionales que contribuyen al mantenimiento de los procesos ecológicos (Armengot et al., 2021).

Desde la perspectiva de la administración medioambiental, mantener la biodiversidad en cacaotales significa implementar prácticas productivas que sean compatibles con el mantenimiento de especies nativas. Ejemplos de estas prácticas son proteger los relictos forestales dentro o alrededor de las fincas, regular el empleo de agroquímicos y fomentar prácticas que favorezcan a la flora y fauna asociadas al cultivo. Se ha documentado que la implementación de sistemas agroforestales con cacao en paisajes degradados mejora servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono, la conservación del suelo y la regulación hídrica, a la vez que contribuye a la recuperación de corredores biológicos y a la reducción de la presión sobre bosques remanentes. En este sentido, los sistemas cacaoteros manejados bajo principios agroforestales se reconocen como “agricultura amigable con la vida silvestre”, al ofrecer una

alternativa productiva que combina rentabilidad económica con la conservación de la biodiversidad a escala de finca y de paisaje (Toledo et al., 2021).

2.3.3.7 Prevención de deforestación y conservación de cobertura boscosa.

La prevención de la deforestación y la conservación de la cobertura boscosa en zonas cacaoteras se basan en evitar la expansión del cultivo sobre áreas de bosque primario y promover modelos productivos que mantengan o restauren la vegetación arbórea existente en el paisaje. Diversos estudios han evidenciado que la expansión desordenada de plantaciones de cacao puede convertirse en un factor importante de pérdida de bosques tropicales, por lo que las estrategias de manejo ambiental incluyen la zonificación del uso del suelo, el respeto a áreas protegidas y la implementación de sistemas productivos que integren árboles y cacao sin eliminar completamente la cobertura forestal original. En este contexto, las iniciativas de cacao libre de deforestación y los acuerdos entre gobiernos, organizaciones y cadena de valor buscan asegurar que la producción no se asocie a talas recientes, incorporando trazabilidad y criterios de conservación en los esquemas de certificación y acceso a mercados (Carodenuto et al., 2021).

La preservación de la cobertura boscosa en sistemas cacaoteros se lleva a cabo también mediante el establecimiento de sistemas agroforestales en los que el cacao se cultiva bajo la sombra de árboles nativos o extranjeros, lo cual posibilita conservar fragmentos boscosos y corredores biológicos en entornos agrícolas. Al proporcionar una opción de uso del suelo que conjuga la producción de cacao con servicios ecosistémicos, como el resguardo del suelo, la regulación hídrica, el hábitat para fauna silvestre y la captura de carbono, estos sistemas agroforestales ayudan a disminuir la presión sobre los bosques remanentes. Se ha notado, además, que, si los cacaotales están cerca de áreas con cobertura arbórea, la polinización y la capacidad del cultivo para adaptarse a situaciones climáticas extremas pueden mejorar. Esto

conecta la preservación de bosques con la sostenibilidad económica y productiva de los pequeños productores de cacao (Higonnet et al., 2022).

2.3.3.8 Manejo ambiental de agroquímicos en el cultivo de cacao.

El manejo ambiental de agroquímicos en el cultivo de cacao se orienta a minimizar los impactos negativos de fertilizantes, herbicidas, fungicidas e insecticidas sobre el suelo, el agua, la biodiversidad y la salud humana, mediante el uso responsable y técnicamente justificado de estos insumos. Diversos estudios en cacaotales, incluido el caso de la variedad CCN-51 en Ecuador, han demostrado que el uso indiscriminado de agroquímicos genera impactos severos y moderados sobre los ecosistemas locales, lo que ha llevado a proponer estrategias basadas en buenas prácticas agrícolas, educación ambiental y adopción de alternativas más sostenibles. Desde esta perspectiva, la gestión medioambiental consiste en elegir productos permitidos, observar las dosis y frecuencias sugeridas, y no hacer aplicaciones cerca de zonas sensibles o fuentes de agua para disminuir la contaminación difusa y el acopio de desechos en el entorno (Castro et al., 2022).

Aquí, el concepto de “manejo integrado de agroquímicos en el cultivo de cacao” el cual plantea que los plaguicidas y los fertilizantes constituyen un complemento a las prácticas de carácter preventivo, tales como el manejo integrado de plagas, la fertilización racional, el uso de coberturas vegetales, y no la principal herramienta de control. Los manuales técnicos y las guías sectoriales afirman que el uso de plaguicidas debe ser considerado como última alternativa y que primero deben ser priorizadas las medidas culturales, biológicas y mecánicas, y cuando su uso sí que es inevitable, se precisa de la capacitación del personal, el manejo de equipos de protección personal, el manejo seguro de los envases vacíos, y la correcta disposición de residuos para evitar riesgos tóxicos y contaminación. Igualmente, evaluaciones de ciclo de vida de sistemas cacaoteros han mostrado que la disminución del uso de insumos químicos, el manejo orgánico, o el manejo con baja externalidad disminuyen la huella

ambiental de la producción de cacao, conservando incluso niveles de rentabilidad comparable cuando se incorporan coproductos y buenas prácticas de manejo (Salazar et al., 2023).

2.3.4 Metodología de desarrollo Scrum

A principios del siglo XXI, el desarrollo de software fue testigo de un cambio significativo cuando un grupo de especialistas comenzó a dudar de la rigidez de los enfoques secuenciales habituales. Y así nació el Manifiesto Ágil, que formalizó cuatro principios con el fin de modificar las prioridades del proceso de desarrollo: introducir un mayor énfasis en las personas sobre los procesos, en el software que funcione sobre la extensa documentación, en la colaboración con el cliente en vez de en los contratos y en la adaptación al cambio en vez de seguir el plan (Martínez y Gómez, 2022). De entre los enfoques que surgieron tras estos principios, Scrum se ha desarrollado como uno de los más aceptados en la práctica profesional.

Es importante matizar un aspecto que suele ser constantemente erróneamente interpretado: en Scrum no hay que considerar a una rigurosa metodología sino un marco de trabajo siendo este ligero y superficialmente modesto. En este se contemplan solamente los aspectos mínimos exigibles, dejando que cada equipo integre las prácticas técnicas que más le conviene aplicando en su contexto (Schwaber y Sutherland, 2020). Dicha característica no se interpreta como una limitación sino como toma de una decisión consciente dado que no se trata de indicar cómo programar, cómo testear o cómo diseñar la arquitectura sino se habla de organizar el trabajo de tal forma que los problemas puedan hallarse adecuadamente. En este documento, el término metodología se realiza en su sentido académico, considerando a Scrum como la metodología que se aplica en la ejecución del desarrollo.

El funcionamiento del marco de Scrum se basa en el control empírico de los procesos, por el apoyo de tres pilares: la transparencia, la revisión y la adaptación. La transparencia hace que el trabajo en curso sea visible para todas las personas implicadas, con el fin de minimizar el impacto de la posibilidad de tomar decisiones sobre información incompleta o errónea. La

revisión conlleva la comprobación del producto y del progreso en los objetivos y del trabajo en curso. La adaptación obliga a tomar las decisiones correctas, por lo que cuando se producen desvíos, ello implica que se debe presentar un curso distinto. Estos tres pilares son interdependientes: la revisión únicamente tiene sentido si hay transparencia y la adaptación está relacionada con la revisión porque si no se revisa que hay un desvío, no se puede adaptar el proceso, ni el producto. Por último, Scrum aplica cinco valores fundamentales en su marco, que serán el soporte y el motor del Scrum: compromiso, concentración, apertura, respeto y valor.

Scrum sugiere un trabajo en equipo con pequeñas y autodirigidas, además de no tener una jerarquía interna específica en la que coexisten tres roles muy precisos. El rol del Product Owner lo lleva a cabo el integrante del equipo que se hace cargo de representar a los intereses de los stakeholders y de maximizar el valor del producto, gestionando y priorizando el Product Backlog. El Product Owner es el encargado del "qué" del producto que se tiene que construir. El rol del Scrum Master es el encargado de aplicar correctamente el marco de trabajo y de eliminar los impedimentos para el funcionamiento del equipo. Los Desarrolladores son los responsables de construir el incremento del producto y de cumplir el objetivo para cada Sprint.

Esta función de trabajo está distribuida en tres artefactos, cada uno de ellos relacionado con un compromiso que permite para la verificación de su cumplimiento. El Product Backlog agrupa todos los elementos requeridos para la creación del producto, vinculado con el Objetivo del Producto. El Sprint Backlog incluye los elementos seleccionados para el Sprint correspondiente con el plan para su desarrollo, y está vinculado con el Objetivo del Sprint. El Incremento es la función del acumulado desarrollo parcial, cuya finalización se permite validar por medio de una Definición de Hecho, es decir, a través de los criterios de calidad que determinan que una tarea es considerada como terminada.

Estos elementos son controlados a través de eventos de una duración definida que determinan cómo se desarrolla el ciclo de trabajo. En este sentido, el Sprint constituye el principal contenedor y permite la generación de un incremento. La Planificación del Sprint determina qué actividades realizar y cómo hacerlo. El Scrum Diario permite a los miembros del equipo colaborar y ser conscientes del grado de avance hacia el objetivo. La revisión del Sprint permite comunicar los resultados a los interesados y recibir información sobre ellos. Por último, la Retrospectiva permite analizar cómo ha ido el trabajo y encontrar mejoras para el próximo ciclo.

2.4 Conclusiones del marco teórico

La revisión teórica permitió llegar a la conclusión de que el monitoreo ambiental consiste en medir y seguir de manera continua el comportamiento de variables del entorno agrícola, en concreto, la temperatura y la humedad. Además, las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) permiten que haya un momento de adquisición, un momento de transmisión y un momento de disponibilidad de los datos ambientales, que permiten registrar datos y consultarlos para hacer un seguimiento de las condiciones del cultivo.

En lo que respecta a la gestión del cultivo de cacao, los fundamentos teóricos constatan que la disponibilidad de la información ambiental es un aspecto a tener en cuenta para la actividad del riego, la fertilización o el control fitosanitario. Tener conocimiento de las condiciones ambientales permite compatibilizar decisiones sobre el manejo agronómico y hacer un seguimiento más ajustado a lo que pide un cultivo.

La conexión teórica que existe entre el monitoreo medioambiental y la gestión del cultivo de cacao va en la línea de un uso de los datos medios ambientales como fuente de información del manejo agronómico. Así, el monitoreo de las condiciones del medio proporciona información que puede ser utilizada durante la planificación y la implementación de las actividades del cultivo.

Finalmente, la revisión de Scrum permitió identificar que este marco de trabajo organiza el desarrollo mediante ciclos iterativos e incrementales, los cuales se denominan Sprints y que se apoyan en roles, eventos y artefactos definidos. Su fundamento se apoya en la planificación, revisión y adaptación del proceso de desarrollo.

CAPÍTULO III

3 MARCO INVESTIGATIVO

3.1 Introducción

El desarrollo e implementación de la arquitectura de software e Internet de las Cosas (IoT) orientada al monitoreo ambiental en el Vivero Lastenia Vera de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), Extensión El Carmen, requiere un sustento metodológico riguroso que guíe la recolección, procesamiento y análisis de datos en el entorno real de estudio. Este capítulo se ocupa de delimitar el marco investigativo que permite fundamentar las decisiones en cuanto a las técnicas y a las operaciones del presente proyecto, entrelazando los rigores científicos y las necesidades nodales de la ingeniería del software y la producción agrícola de *Theobroma cacao*. Para ello, se desarrolla una elaboración estructural de los tipos de investigación, de los métodos de análisis, así como de las fuentes de recogida de información y de estrategias operativas aplicadas, entre otras cosas, al diagnóstico y a la validación del sistema.

En primera instancia, se caracterizan los enfoques de investigación aplicada, de campo y descriptiva que sustentan tanto la recolección de variables físicas en el vivero como el diseño de la arquitectura cliente-servidor. Asimismo, se exponen los métodos analítico y sintético empleados para desglosar y articular los componentes de software, hardware y redes LoRaWAN. Por otra parte, se define la estrategia muestral aplicada a la población de estudiantes de Agropecuaria y la entrevista técnica dirigida a la coordinación del vivero, asegurando la validez estadística y cualitativa de los instrumentos. Finalmente, el capítulo integra el análisis detallado y la triangulación de los resultados obtenidos, argumentando la necesidad técnica de automatizar la supervisión agroclimática mediante alertas y monitoreo en tiempo real para mitigar el estrés hídrico y optimizar la toma de decisiones agrícolas.

3.2 Tipos de investigación

3.2.1 Investigación Aplicada

La investigación aplicada se fundamenta en la generación y utilización de conocimientos con el objetivo primordial de alcanzar un fin o propósito práctico identificado previamente en el mundo real. A diferencia de la investigación básica, este enfoque no se limita a la construcción de marcos teóricos abstractos, sino que se encarga de determinar, a través del rigor científico, los medios tecnológicos, protocolos o metodologías necesarias para satisfacer una necesidad técnica reconocida y específica. Según las fuentes, este tipo de estudio transforma los hallazgos de la investigación pura en herramientas operativas que resuelven desafíos inmediatos en campos como la ingeniería y la tecnología (Hernández y Mendoza, 2021).

Se aplicó este tipo de investigación en la fase del desarrollo técnico de la arquitectura cliente-servidor para convertir los conceptos de redes y programación de microcontroladores en una respuesta que fuera una solución tecnológica que solucionara la necesidad de controlar las condiciones ambientales del cacao, para aplicar protocolos de comunicación de datos y generar el sistema informático que garantizara la resolución del problema de la falta de supervisión automatizada del vivero.

3.2.2 Investigación de Campo

La investigación de campo es un modelo metodológico que se caracteriza por la recolección de datos e información primaria directamente en el lugar y el tiempo exacto donde se manifiesta el fenómeno objeto de estudio. Este enfoque es fundamental en las ciencias aplicadas, ya que su objetivo primordial es realizar un levantamiento de información ordenado y fidedigno en el contexto natural de los hechos, utilizando técnicas como la observación directa o la medición in situ. De acuerdo con las fuentes consultadas, este tipo de indagación

permite al investigador tener un contacto directo con la realidad, capturando los datos tal como ocurren espontáneamente en el entorno geográfico definido (Ramírez y Vargas, 2022).

Se empleó específicamente en las instalaciones del Vivero Lastenia ULEAM El Carmen. Se utilizó en la fase de implementación y pruebas de los sensores IoT, donde el microcontrolador recolectó datos reales de humedad y temperatura directamente del microclima del cultivo de cacao. Su uso en el proyecto es vital para garantizar que la información que procesa el servidor sea verídica y corresponda fielmente a las condiciones físicas del terreno del vivero.

3.2.3 Investigación Descriptiva

El objetivo principal de la investigación descriptiva es detallar las propiedades, perfiles y rasgos fundamentales de un fenómeno, grupo u objeto de estudio específico que se somete a análisis científico. Este grado de investigación se concentra en medir diferentes variables de manera individual para ofrecer una representación detallada y exacta de la realidad estudiada, sin que el investigador intervenga activamente en las mencionadas variables. De acuerdo con las fuentes, la investigación descriptiva sirve como una caracterización de las circunstancias presentes, posibilitando la comprensión del comportamiento de los factores investigados en un contexto específico (Arias, 2021).

Este tipo de investigación se utilizó para caracterizar el comportamiento de las variables ambientales (luz, humedad, temperatura) que influyen en el crecimiento del *Theobroma cacao*. El sistema, por medio de la arquitectura IoT, tendrá la capacidad de caracterizar con detalle los cambios climáticos que ocurren todos los días en el vivero. El propósito de este procedimiento es ofrecer un diagnóstico documentado y claro de las necesidades ambientales del cultivo, lo cual servirá como fundamento para decisiones agrícolas que se tomen en el futuro.

3.3 Métodos de investigación

3.3.1 Método Analítico

El procedimiento analítico es una forma de conocimiento que implica dividir en sus partes constitutivas o elementos individuales un objeto de estudio complejo, con el fin de analizarlas minuciosamente y de manera independiente. De acuerdo con las fuentes, este método posibilita que se haga una división mental del todo para entender sus múltiples relaciones y características internas. El investigador tiene la posibilidad de ahondar en los rasgos fundamentales de cada componente del fenómeno estudiado por medio de este análisis (Hernández y Mendoza, 2021).

Se utilizó para desglosar la arquitectura integral en sus componentes esenciales: la gestión de la base de datos en el servidor, los protocolos de comunicación (HTTP, por ejemplo), el desempeño del microcontrolador y la precisión de los sensores ambientales. La finalidad es analizar cada elemento individualmente para garantizar que sea viable desde el punto de vista técnico y operativo la recolección de datos sobre el *Theobroma cacao* antes de integrarla completamente.

3.3.2 Método Sintético

El método sintético se define como un proceso de razonamiento que busca la integración de los componentes que se encuentran dispersos en un objeto de estudio para analizarlos en su totalidad. Las fuentes señalan que la síntesis establece mentalmente la unión entre las partes previamente analizadas, permitiendo descubrir relaciones esenciales y características generales entre ellas. Este método no es un simple retorno al todo, sino que genera una nueva cualidad en el conocimiento al sistematizar los elementos de forma unificada (Ramírez y Vargas, 2022).

Este método se aplicó específicamente durante la etapa de ensamblaje e implementación de la arquitectura cliente-servidor. Se usará para articular el hardware

(microcontrolador y sensores) con el software (servidor y plataforma de monitoreo) en el Vivero Lastenia. La finalidad es que todos los elementos técnicos operen como un sistema único y cohesionado, para que la supervisión ambiental del cacao no sea solo una simple suma de lecturas independientes, sino una herramienta integral y funcional para el vivero.

3.4 Fuentes de información de datos

3.4.1 Encuestas

Se entiende por encuesta un instrumento de investigación, tanto técnico como metodológico, que tiene como objetivo recoger información sistemática acerca de las actitudes, los comportamientos o las opiniones de una determinada colectividad social. La encuesta, a diferencia de los censos, que incluyen a toda la población, emplea técnicas de muestreo científico para recabar información de una parte representativa. Esto posibilita hacer inferencias descriptivas y explicativas sobre la realidad de manera eficaz en cuanto a tiempo y costo. En esencia, esta herramienta funciona como un mecanismo para objetivar y medir variables individuales, transformando las observaciones del mundo social en datos cuantitativos susceptibles de análisis estadístico (Ramírez y Vargas, 2022).

La encuesta se aplicó a los estudiantes de la carrera de Agropecuaria que realizan prácticas en el vivero Lastenia Vera, ya que son ellos quienes poseen el conocimiento directo sobre las necesidades hídricas y climáticas del cultivo en sus distintas etapas de crecimiento. Se busca, al trabajar con este grupo, comprender los retos que están afrontando actualmente con el control manual de las variables ambientales y localizar los aspectos críticos en los que la automatización podría ser más ventajosa. Por tanto, el instrumento tratará temas generales, como los métodos de riego empleados, la valoración técnica respecto a la incorporación de sensores electrónicos para optimizar la producción del cacao, la gestión de riesgos ante cambios climáticos severos y la precisión y regularidad del monitoreo presente de temperatura y humedad.

3.4.2 Entrevista

La entrevista se puede definir, a partir de lo expuesto en las fuentes, como un proceso de auto reporte en el que un individuo suministra información directamente a un investigador o encuestador. Este instrumento es esencial para obtener datos que no figuran en registros oficiales, permitiendo capturar la realidad desde la perspectiva del sujeto; sin embargo, su precisión depende de la memoria y la disposición del entrevistado, ya que generalmente se realiza sin la exigencia de documentación que respalde las declaraciones vertidas (Ramírez y Vargas, 2022).

Se llevó a cabo una entrevista al Mgs. Pedro Nivelá, Coordinador del vivero. Se eligió a este profesional en virtud del conocido conocimiento del mismo en lo que se refiere a las necesidades biológicas del cultivo, así como en lo que toca a la competencia técnica de la operación del vivero, hecho que permite garantizar información de calidad para el diseño del sistema al que se refiere este trabajo. Los temas que se abordaron en la entrevista son todos aquellos que tienen que ver con los niveles óptimos de temperatura y humedad para el desarrollo de plántulas; los problemas más frecuentes asociados al actual monitoreo manual; las áreas claves del control donde la automatización de sensores proporcionaría un valor añadido importante en términos de reducción de la mortalidad del cultivo de cacao en la etapa del plantón.

3.5 Estrategia operacional para la recolección de datos

3.5.1 Población

Según las fuentes, la población se define como el total de personas que componen un grupo social o residen en un espacio específico. Su estructura demográfica posibilita la identificación de fenómenos colectivos y la fijación de las normas para organizar a la sociedad en su conjunto. Se estima un recurso estratégico que comprende individuos cuyas habilidades

y participación activa son esenciales para la activación y el mantenimiento de un entorno particular, por ejemplo, el ambiente rural (Ramírez y Vargas, 2022).

La población de la investigación estuvo constituida por 90 personas que se encontraban vinculadas directamente con las actividades del vivero Lastenia Vera de la ULEAM, Extensión El Carmen, de las cuales 89 eran estudiantes de la carrera de Agropecuaria que realizan prácticas en el vivero llevando a cabo actividades como riego, control fitosanitario y observación de las plántulas de *Theobroma cacao*; justo por esto eran una fuente directa de información sobre las limitaciones del monitoreo manual actualmente aplicado. La población también estuvo integrada por 1 persona en función de supervisión, el Mg. Pedro Nivelá, Coordinador del vivero Lastenia Vera, quien era considerado por ser el responsable de la planificación técnica y del control de calidad del vivero, así como también por sus conocimientos en cuanto a las condiciones ambientales óptimas que requiere el cacao en sus primeras etapas de desarrollo.

3.5.2 Muestra

La muestra se define como un subconjunto o segmento específico de la población total que se selecciona para ser el objeto directo de análisis en una investigación. Su propósito fundamental es permitir el estudio de un fenómeno a través de la recolección de datos primarios mediante instrumentos validados, utilizando criterios de selección deliberados (como el rango de empleados o la ubicación geográfica) para que el análisis sea manejable y preciso (Hernández y Mendoza, 2021).

Debido al tamaño reducido y accesible de la población objeto de estudio, no se aplicó una fórmula estadística para calcular la muestra. Por lo que se trabajó con el total de los 89 estudiantes de la carrera de Agropecuaria que estaban relacionados con las prácticas llevadas a cabo en el vivero Lastenia Vera, por lo que se realizó un estudio censal de la población. La técnica de la encuesta fue aplicada a los 89 alumnos a través de la utilización de un cuestionario

como instrumento para la recolección de datos. Asimismo, el coordinador del vivero fue considerado como informante clave y se le aplicó la técnica de la entrevista mediante un guion de entrevista. Así, la recolección de información abarcó a los 90 participantes que conformaron la población de investigación.

3.5.3 Análisis de las herramientas de recolección de datos a utilizar

3.5.3.1 Encuesta.

La encuesta estuvo dirigida a los estudiantes de la carrera de Agropecuaria que realizaron prácticas en el Vivero Lastenia con el cultivo de cacao, con el fin de conocer su percepción sobre el manejo diario del monitoreo y del riego.

3.5.3.2 Entrevista.

Esta entrevista semiestructurada se preparó para ser aplicada al Mg. Pedro Nivelá, Coordinador del vivero, que es quien mejor conoce cómo se maneja todo ahí en el día a día con el cacao. Tiene 13 preguntas las cuales fueron seleccionadas y adaptadas a un cuestionario más grande, y posteriormente organizadas por temas para que fluya bien: primero cómo ven el monitoreo actual, después los problemas con el agua y el estrés en las plantas, luego cómo ayudarían datos en tiempo real y alertas, y al final qué pasa con la tecnología tipo IoT.

3.5.4 Estructura de los instrumentos de recolección de datos aplicados

3.5.4.1 Estructura de encuesta.

Para la recolección de datos, se diseñó un cuestionario estructurado que evalúa las variables clave del proyecto. Las capturas detalladas de la interfaz y la estructura completa de las preguntas implementadas se encuentran disponibles para su revisión en el Anexo D. El instrumento estuvo conformado por 30 preguntas cerradas, con opciones de respuesta única, estructuradas mediante escalas tipo Likert, frecuencia y dicotómicas de sí/no, lo que facilitó su aplicación y posterior análisis. Igualmente, el cuestionario llevó a cabo la valoración desde la

situación actual hasta la valoración de la utilidad de incorporar tecnología IoT al sistema de monitoreo e incluso desde esta situación actual y problemas con el riego, errores en los registros manuales, falta de alertas, hasta decidir e introducir, todo ello por temáticas clave. El orden de las temáticas clave estaba hecho para conectar directo con la necesidad de mi arquitectura cliente-servidor para monitoreo ambiental

3.5.4.2 Estructura de entrevista.

La entrevista se estructuró siguiendo un orden temático adaptado a las necesidades de la investigación. El cuestionario técnico y la evidencia de su diseño se detallan en el Anexo E. Las preguntas cubren lo esencial del vivero: la efectividad del monitoreo manual de temperatura y humedad, el impacto de no tener datos rápidos en el estrés hídrico y riego, el valor de alertas automáticas para decisiones diarias, y cómo un sistema tecnológico podría mejorar la supervivencia de las plántulas. Así se conecta directo con mi propuesta de arquitectura cliente-servidor para monitoreo ambiental.

3.5.5 Plan de recolección de datos

Tabla 1 *Tabla de recolección de datos*

ACTIVIDAD	RESPONSABLES	FECHA
Entrevista al Coordinador del Vivero Lastenia	Bryan Lopez David Guerrero Anderson Plua Anthony Zambrano Kevin Rodríguez Dereck Castro	15/04/2026
Encuesta a los estudiantes de Agropecuaria de la Uleam extensión El Carmen	Bryan Lopez David Guerrero Anderson Plua Anthony Zambrano Kevin Rodríguez Dereck Castro	28/01/2026 – 15/04/2026

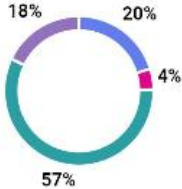
3.6 Análisis y presentación de resultados

3.6.1 Presentación y descripción de los resultados obtenidos

3.6.1.1 Análisis de encuesta realizada a estudiantes de la carrera de Agropecuaria de la Uleam Extensión El Carmen.

Tabla 2 Análisis de Encuesta

PREGUNTA	GRÁFICO	INTERPRETACIÓN
Pregunta 1: ¿Está usted de acuerdo que el proceso actual de monitoreo climático del vivero permite obtener información oportuna sobre el estado ambiental de las plantas?	- Totalmente en desacuerdo: 24 - En desacuerdo: 1 - Ni de acuerdo ni en desacuerdo: 16 - De acuerdo: 36 - Totalmente de acuerdo: 12	Los resultados evidencian que existe una tendencia favorable hacia el proceso actual de monitoreo climático del vivero, debido a que una parte importante de los encuestados manifestó estar de acuerdo o totalmente de acuerdo con su utilidad.
Pregunta 3: ¿Considera usted que el estrés hídrico causado por el excesivo de agua o la falta de esta en las plantas de cacao se presenta debido a la falta de información oportuna sobre las condiciones climáticas?	- Totalmente en desacuerdo: 15 - En desacuerdo: 2 - Ni de acuerdo ni en desacuerdo: 28 - De acuerdo: 37 - Totalmente de acuerdo: 7	Los resultados evidencian que la muestra de los encuestados aprecia la relación que existe entre el estrés hídrico que experimentan las plantas de cacao con la disponibilidad de información climática en el tiempo y el momento para aplicarlo, aunque se aprecia respuestas neutrales y contrarias a que esta relación se da por sentada, lo que puede apuntar a que esta relación no se contempla de una manera homogénea.

PREGUNTA	GRÁFICO	INTERPRETACIÓN
Pregunta 7: ¿De qué manera, evaluaría el método actual de monitoreo manual de variables ambientales (temperatura, humedad) para el desarrollo de las plántulas de cacao?	 ● Muy eficaz 21 ● Eficaz 45 ● Ni eficaz ni ineficaz 18 ● Ineficaz 4 ● Muy ineficaz 1	En esta pregunta se observa una valoración mayoritariamente favorable del método actual de monitoreo manual de variables ambientales. No obstante, también aparece un grupo que no lo considera totalmente eficaz, lo que indica que, aunque cumple parcialmente su función
Pregunta 8: ¿De qué manera considera que influye el acceso a información ambiental en tiempo real sobre la toma de decisiones fitosanitarias en el vivero?	 ● Complica la toma de decisiones 18 ● No influye 4 ● Facilita moderadamente la toma de decisiones 51 ● Facilita significativamente la toma de decisiones 16	Los resultados ponen de manifiesto cómo el acceso a información ambiental de forma continua y en tiempo real apoya de forma positiva la toma de decisiones fitosanitarias en el vivero. Sin embargo, no todos los encuestados lo valoran por igual y apunta que el sistema actual no asegura en el presente un soporte completamente adecuado para resolver a tiempo las necesidades del cultivo.

PREGUNTA	GRÁFICO	INTERPRETACIÓN
Pregunta 9: De acuerdo con su experiencia ¿qué efecto considera que tendría un sistema tecnológico de monitoreo en la tasa de supervivencia de las plántulas de <i>Theobroma cacao</i> ?	Efecto negativo 9 Ningún efecto 10 Efecto positivo moderado 54 Efecto positivo significativo 16 18% 10% 11% 61%	Se evidencia que la mayoría de los encuestados considera que un sistema tecnológico de monitoreo tendría un efecto favorable en la supervivencia de las plántulas de cacao. Sin embargo, la existencia de respuestas que no reconocen ese beneficio o que incluso anticipan un efecto negativo muestra que aún persisten dudas sobre su impacto real, por lo que se justifica la implementación de una propuesta tecnológica más clara y confiable
Pregunta 11: ¿Cómo valora la utilidad de recibir alertas automáticas (ej. notificaciones de calor extremo) para la prevención de daños en los cultivos?	Inútil 3 Poco útil 13 Útil 54 Muy útil 19 21% 15% 61%	Los resultados muestran una valoración positiva sobre la utilidad de recibir alertas automáticas para prevenir daños en los cultivos. A pesar de ello, también se observa que algunos encuestados no las consideran totalmente útiles, lo que indica que todavía hay margen para fortalecer este recurso y demostrar su efectividad como apoyo en la prevención y en la toma de decisiones oportunas.

3.6.1.2 Análisis de entrevista realizada a Coordinador del Vivero Lastenia Vera.

Tabla 3 *Análisis de entrevista*

PREGUNTA	RESPUESTA	INTERPRETACIÓN
Pregunta 1: Desde su experiencia técnica, ¿cuáles son los rangos óptimos de temperatura y humedad que garantizan la supervivencia de la plántula de cacao en su fase inicial?	Bueno si hablamos desde la fase inicial desde la siembra nosotros tenemos que controlar la temperatura debe de haber una temperatura un poco alta para poder germinal hay un balance entre humedad y temperatura en el sustrato en el terreno para que la semilla germine una vez que por lo general el cacao es tropical por lo menos debemos tener un rango entre 28 a 30 grados Celsius y con un porcentaje no relativa no mayor al 75 % para evitar problemas de plagas enfermedades principalmente	Esta respuesta confirma que el cultivo de cacao en etapa inicial necesita condiciones ambientales específicas para su adecuado desarrollo. El rango señalado evidencia la importancia de controlar temperatura y humedad, porque un exceso de humedad podría favorecer problemas fitosanitarios.
Pregunta 2: ¿Cómo influye la falta de instrumentos de medición de variables ambientales en la aparición del estrés hídrico y otros problemas observados en las plántulas de cacao?	Claro justamente a pesar que la planta de cacao tiene mucho mecanismo para poder regular el proceso metabólico, pero ya en un estado avanzado de falta de agua si se produce un estrés hídrico entonces para ello a simple vista podemos observar cuando la planta necesita agua, pero claro si	La respuesta evidencia que el manejo actual es principalmente dependiente de la observación directa. Esto puede retrasar la detección temprana del estrés hídrico, afectando el crecimiento de las plantas.

PREGUNTA	RESPUESTA	INTERPRETACIÓN
	tuviéramos la herramienta como sensores que puedan determinar sería ideal	
Pregunta 3: ¿Cree que la falta de monitoreo automatizado de humedad y temperatura en tiempo real contribuye al estrés hídrico de las plantas de cacao? ¿Por qué?	Claro si lo que pasa es que como tenemos muchos confusiones en el clima en esta zona por la nubosidad y tantos factores más como el viento la elofania otro factor importante de las plantas entonces estas frustraciones producen estrés en las plantitas de cacao, entonces si es necesario tener un monitoreo contante con equipos para saber por ejemplo cuando sube la temperatura y ver el mecanismo para regular como el mismo riego, micro riego ósea estrategias que permiten optimizar y evitar esos cambios bruscos que a la larga afectan el desarrollo y el metabolismo de la planta	Esta respuesta muestra que la variabilidad climática influye directamente en el estrés de las plántulas y que la ausencia de monitoreo en tiempo real limita la capacidad de respuesta. Por tanto, un sistema automatizado permitiría anticipar alteraciones ambientales y ejecutar acciones correctivas de manera más eficiente.
Pregunta 4: ¿Qué indicadores o rasgos físicos en las plántulas le permiten determinar que la gestión de datos ambientales está siendo exitosa o deficiente?	Principalmente el color, el brillo de las platas es un indicador que nos permite establecer estado no solamente de agua sino el estado de salud de las plantitas, estado nutritivo	La respuesta demuestra que el estado fisiológico de las plántulas puede evaluarse mediante rasgos visuales, aunque estos indicadores son tardíos y subjetivos. Si las plantas presentan brillo y

PREGUNTA	RESPUESTA	INTERPRETACIÓN
	entonces para que la planta se nutra tiene que haber capacidad de campo, oxígeno y agua entonces si usted tiene esas condiciones las plantas se ven vigorosas tienen un color verde brillante	buen color, significa que el manejo ambiental y nutricional es adecuado. Sin embargo, depender solo de observación visual no garantiza una detección temprana de problemas, por lo que el monitoreo automático complementaría y fortalecería esta evaluación.
Pregunta 5: ¿Cuáles son los principales problemas que enfrenta el Vivero Lastenia relacionados con la gestión del riego y demás variables ambientales en el cacao?	Bueno principalmente hemos tenido el problema más grande el riego por la disponibilidad de agua la disponibilidad hídrica nosotros hemos tenido que improvisar pozos, cisternas para abastecer y poder compensar la demanda entonces nosotros no tenemos una fuente hídrica primaria como riego alguna laguna, sino que tenemos pozos artesanales y tenemos que estar bombeando a dos cisternas mandamos primero a una y de hay mandamos a la que va directa al sistema de riego entonces eso si que se a convertido en un problema, costos principalmente los	Esta respuesta revela una limitación operativa importante relacionada con la infraestructura de abastecimiento de agua. La dependencia de soluciones improvisadas incrementa los costos y dificulta la sostenibilidad del riego.

PREGUNTA	RESPUESTA	INTERPRETACIÓN
	costos el combustible ustedes ven que su presidente nos ha subido el costo entonces eso nos ha afectado	
Pregunta 6: ¿Cuáles son los parámetros técnicos (humedad, temperatura, radiación) que usted considera vitales para el crecimiento óptimo del cacao en esta etapa?	He como le decía la planta para poder expresar todo su potencial genético necesita capacidad de campo, balance, oxígeno y agua en el suelo si temperatura adecuada ambiente controlado sería lo ideal, pero por costos de producción es imposible trabajar con ambiente controlado	La respuesta confirma que el crecimiento óptimo del cacao depende de condiciones físico-ambientales equilibradas, especialmente en el suelo y la temperatura. También evidencia una restricción económica que impide implementar un ambiente completamente controlado.

3.6.2 Informe final del análisis de los datos

Con respecto al proceso de monitoreo y efectividad del método manual actual, los estudiantes de la carrera de Agropecuaria encuestados en las preguntas 1 y 7 manifestaron que, si bien el control visual de variables les permite obtener una noción básica del estado de las plantas, este método presenta limitaciones para garantizar una supervisión continua e ininterrumpida. En contraste, el Coordinador del Vivero expresado en las preguntas 2 y 4 confirmó que la gestión ambiental del recinto depende mayoritariamente de la observación visual de rasgos fisiológicos tardíos, como el brillo o el color de las hojas. Esta comparación evidencia que tanto los practicantes como la dirección técnica coinciden en que la observación directa es un mecanismo subjetivo e insuficientemente preventivo, lo que confirma la necesidad

de sustituir o complementar las mediciones manuales por un sistema de captura de datos automatizado y preciso.

En lo referente al proceso de detección y mitigar el estrés hídrico en las plántulas, los encuestados en la pregunta 3 reconocieron de forma mayoritaria la relación directa entre la falta de información ambiental oportuna y la aparición de estrés por déficit o exceso de agua. Por su parte, el Coordinador enfatizó en las preguntas 1, 3 y 5 las serias dificultades operativas que enfrenta el vivero debido a la inestabilidad en la fuente hídrica (abastecimiento por pozos artesanales y bombeo a cisternas) combinada con variaciones climáticas bruscas como la radiación o el viento. Al triangular ambas perspectivas, se concluye que el estrés hídrico no solo se debe al manejo de los recursos de riego, sino a la falta de mediciones en tiempo real que permitan ajustar el suministro hídrico según las demandas fisiológicas exactas del *Theobroma cacao* en sus etapas iniciales.

En cuanto al proceso de notificación, alertas y toma de decisiones en tiempo real, los datos de la encuesta reflejados en las preguntas 8 y 11 señalan una alta valoración hacia la recepción de alertas automáticas (por ejemplo, notificaciones ante incrementos extremos de temperatura), argumentando que esta tecnología optimizaría sustancialmente la toma de decisiones fitosanitarias. Coincidiendo con esta postura, el entrevistado fundamentó en las preguntas 1 y 3 que sobrepasar el rango térmico ideal (28 °C a 30 °C) o un exceso de humedad relativa (mayor al 75 %) desata rápidamente proliferación de plagas y enfermedades. De este modo, queda demostrado que la ausencia de un canal de alerta temprana en tiempo real restringe la capacidad de respuesta oportuna ante fluctuaciones climáticas críticas, justificando la incorporación de la arquitectura IoT para notificar eventos anómalos de manera inmediata.

Por último, en relación al proceso de adopción de tecnología y mejora de la tasa de supervivencia del cultivo, las respuestas obtenidas en la pregunta 9 de la encuesta demuestran que la mayoría de los estudiantes anticipa un impacto significativamente favorable en el

desarrollo de las plántulas tras la implementación de herramientas tecnológicas de monitoreo. En esa misma línea, el Coordinador sostuvo en la pregunta 6 que implementar un ambiente plenamente controlado es inviable por los elevados costos de producción, por lo que una solución basada en sensores y monitoreo remoto representa la alternativa técnica ideal para maximizar el potencial genético del cultivo de forma económicamente sustentable. Por consiguiente, existe una clara convergencia entre la percepción de los usuarios finales y la visión técnica de la coordinación, ratificando la viabilidad, utilidad y pertinencia de la arquitectura cliente-servidor propuesta para la supervisión ambiental del Vivero Lastenia.

CAPÍTULO IV

4 MARCO PROPOSITIVO

4.1 Introducción

El presente capítulo expone la implementación del módulo de comunicación del sistema de monitorización ambiental del cultivo de *Theobroma cacao* del Vivero Lastenia Vera, sobre la arquitectura cliente-servidor con microcontroladores IoT, cuyo objetivo es transferir de forma fiable las mediciones ambientales entre la estación de campo y la unidad central, utilizando un radioenlace LoRa punto a punto entre la estación y el gateway, y posteriormente reenviándolas al servidor mediante peticiones HTTP sobre WiFi. En este sentido, la capa de comunicación es el puente entre la obtención del dato en campo y su posterior almacenamiento y consulta.

Se llevó a cabo el desarrollo aplicando la metodología ágil Scrum, la cual permitió realizar el desarrollo del módulo conforme a un ciclo iterativo y progresivo, a lo largo de cinco sprints, donde cada sprint se ocupaba de una fase del recorrido del dato: la implementación del enlace LoRa, el empaquetado y parseo de la trama en el gateway, el reenvío del gateway hacia el servidor HTTP, el transporte seguro y autenticado de la trama, así como la verificación de la recepción de la trama y evaluación del enlace. Esta forma de trabajo más bien nos permitió verificar el funcionamiento de cada componente antes de ser integrado, ajustar los parámetros del enlace de acuerdo a la evidencia obtenida en el campo y corregir, de forma temprana, los inconvenientes que iban surgiendo en cada ciclo.

A lo largo del capítulo se documentan, en primer lugar, la descripción del producto, los requerimientos del sistema, el diseño mediante casos de uso, diagramas de secuencia y de estado, la arquitectura y las tecnologías empleadas, así como los roles del equipo y la definición de hecho. Posteriormente se presenta el Product Backlog y el desarrollo detallado de cada uno de los cinco sprints, con su planificación, sus pruebas de caja negra y caja blanca, y los

incrementos alcanzados. Finalmente, se exponen los resultados del módulo de comunicación, dejando en evidencia que el sistema transporta las mediciones ambientales de forma estable y confiable en las condiciones reales del vivero.

4.2 Descripción de la propuesta

La propuesta consiste en el desarrollo de un sistema de monitoreo ambiental basándose en una arquitectura cliente-servidor con microcontroladores IoT, orientando al control de las variables de temperatura, humedad del suelo y luminosidad en el cultivo del cacao. Este sistema permitirá capturar datos en tiempo real mediante sensores conectados a un microcontrolador, procesándolos y enviándolos a una plataforma central para su visualización y análisis. De esta manera, se busca facilitar el seguimiento continuo de las condiciones ambientales del cultivo y apoyar la toma de decisiones oportunas para mejorar su manejo agronómico.

La plataforma está orientada fundamentalmente a los agricultores que se encargan del cultivo del cacao y que podrán supervisar de una forma sencilla el comportamiento de las variables ambientales a través de la correspondiente interfaz web o móvil. Entre las principales funcionalidades destacan la posibilidad de visualizar en tiempo real los datos recabados, el almacenado histórico de las mediciones realizadas, la generación de avisos cuando se producen valores fuera de rango y el acceso diferenciado en función del perfil de los usuarios.

4.3 Determinación de recursos

4.3.1 Humanos

Tabla 4 Recursos humanos

Recurso	Cargo	Función
Bryan Lopez	Autor y Desarrollador	Diseñar e implementar el circuito de adquisición de datos con microcontroladores
Ing. Danilo Arevalo	Tutor del proyecto	Supervisar el cumplimiento de la metodología de desarrollo.

Recurso	Cargo	Función
Mg. Pedro Nivelá	Asesor Técnico Agronómico	Proveer los parámetros biológicos óptimos de temperatura y humedad para el cacao

4.3.2 Tecnológicos

Tabla 5 Recursos tecnológicos

Recurso	Característica	Descripción
Laptop	Sistema Operativo: Microsoft Windows 11 Pro. RAM: 16 GB Procesador: 13th Gen Intel(R) Core (TM) i7-13620H @ 2.40 GHz, de 13va Generación.	Utilizada para el desarrollo del sistema y programación en PlatformIO.
PlatformIO	Última versión estable, como extensión de VS Code.	Entorno de desarrollo empleado para programar y cargar el firmware en el ESP32.
Lenguaje C/C++	Lenguaje de programación embebido.	Empleado para escribir el firmware que controla el módulo LoRa y gestiona la comunicación.
ESP32	Microcontrolador 240 MHz, WiFi/Bluetooth integrado.	Unidad que ejecuta el firmware del gateway y de la estación en la capa de comunicación.
Módulo LoRa Reyax RYLR	Sensor digital de temperatura y humedad	Permite medir condiciones
Router / red WiFi	Módulo de radio de largo alcance controlado por comandos AT.	Permite al gateway reenviar los datos al servidor mediante peticiones HTTP.
Servidor / hosting	Servicio de alojamiento con punto de ingesta HTTP.	Recibe las peticiones enviadas por el gateway.

Recurso	Característica	Descripción
LoRa	Módulo de transmisión de datos	Permite transmitir datos en tiempo real

4.3.3 Económicos

Tabla 6 Recursos económicos

Cantidad	Recurso	Precio unitario	Subtotal
1	Laptop	\$780.00	\$780.00
1	Alojamiento (hosting)	\$40.00	\$40.00
200	Horas de programación	\$5.00	\$1,000.00
4	Servicio de internet (mensual)	\$25.00	\$100.00
1	ESP32	\$10.00	\$10.00
2	Modulos LoRa Reyax	\$40.00	\$80.00
1	Cables	\$2.00	\$2.00
1	Sensor DHT22	\$2.50	\$2.50
TOTAL:			2,014.50

4.4 Desarrollo del sistema bajo la metodología SCRUM

Scrum es un marco de trabajo ágil que permite organizar el desarrollo de proyectos de software mediante un proceso iterativo e incremental. Su esencia consiste fundamentalmente en dividir el trabajo en ciclos muy cortos a los que se les llama sprints; en cada sprint se planifica, ejecutan y revisan actividades específicas del proyecto. De esta manera, es más sencillo mantener una visión clara del avance del proyecto, seguir el avance de las tareas y corregir cualquier inconveniente que se pueda presentar durante el proceso de desarrollo. Scrum también permite una interacción entre los miembros del equipo continuo, así como una adaptación a los cambios en los requerimientos o en el entorno de desarrollo.

En la evolución del presente sistema, se escogió el método Scrum, ya que se ajusta bien a proyectos relacionados con la tecnología que requieren buena planificación, flexibilidad en

los cambios y revisión constante. Habiendo una propuesta basada en microcontroladores, sensores IoT y una interfaz de monitoreo ambiental, se tuvieron que ir haciendo las cosas por trozos, para poder verificar el correcto funcionamiento de los distintos componentes, antes de ser incluidos como parte del sistema. Dicho método de trabajo tuvo el enfoque de ir haciendo las cosas en orden, dando mayor control a los errores que podían corregirse a medida que se iban obteniendo resultados según se iba avanzando. De este modo, el desarrollo del sistema no dependió de una única entrega final, sino de entras entregas funcionales con las que se podían ir evaluando los resultados.

4.4.1 Descripción del producto

4.4.1.1 Propósito del producto.

Diseñar e implementar una arquitectura cliente-servidor basada en microcontrolador IoT, que permita la adquisición, procesamiento y transmisión de datos ambientales en tiempo real hacia una aplicación móvil, con el fin de monitorear de manera continua las condiciones del cultivo y apoyar a los agricultores en la toma de decisiones oportuna frente a variaciones de temperatura, humedad del suelo y luminosidad.

4.4.1.2 Funcionalidades Clave.

Recolección de datos ambientales mediante sensores IoT.

- Captura automática y periódica de temperatura, humedad y luminosidad.
- Envío de datos al servidor central a través de conexión inalámbrica.
- Visualización de las variables ambientales en una aplicación web o móvil.
- Almacenamiento de mediciones para su consulta posterior.
- Generación de alertas cuando los valores superen o desciendan a los rangos establecidos.
- Consulta del estado actual del vivero desde cualquier dispositivo autorizado.

- Registro e identificación de sensores y microcontroladores conectados al sistema.

4.4.1.3 Usuarios Objetivo.

Tabla 7 *Usuario objetivos*

Tipo de usuario	Principales funcionalidades
Administradores del sistema	Administra los permisos de acceso, configura los parámetros del sistema y controla el registro de los dispositivos IoT vinculados a la plataforma.
Operador (Tecnico/Pasante de agropecuaria)	Supervisa la adquisición y transmisión de datos ambientales, valida el estado operativo de los sensores y atiende alertas técnicas generadas por el sistema.
Agricultores (Clientes)	Visualiza la información ambiental en tiempo real y utiliza los datos obtenidos para tomar decisiones oportunas sobre el manejo del cultivo de cacao.

4.4.1.4 Condiciones de Éxito del Producto.

- La transferencia de datos desde los microcontroladores hacia la base de datos.
- El sistema debe generar y enviar notificaciones automáticas al dispositivo móvil.
- EL agricultor debe poder consultar el estado del cultivo de forma remota las 24 horas al día.
- El sistema debe reducir en el menos un 80 % la necesidad de desplazamiento físicos.
- Los datos recolectados deben mantenerse dentro de los rangos de toleración.

4.4.2 Requerimientos del sistema

4.4.2.1 Historias de Usuario.

4.4.2.1.1 *Historia de Usuario 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.*

Tabla 8 *Historia de Usuario 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto*

HISTORIA DE USUARIO			
Id de historia	HU01	Título:	Establecimiento del enlace LoRa punto a punto
Prioridad:	Alta	Usuario:	Operador técnico
Riesgo de desarrollo:	Medio	Tamaño de la tarea:	Grande
Como:	Operador técnico.		
Quiero:	Establecer un enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.		
Para:	Transportar las mediciones ambientales desde el campo sin depender de una infraestructura de red.		
Criterios de aceptación:	La estación y el gateway deben intercambiar tramas dentro de una misma red, y el gateway debe recibir y leer el mensaje sin pérdida de información.		
Dependencias:	Módulos LoRa Reyax configurados por comandos AT en ambos extremos.		

4.4.2.1.2 *Historia de Usuario 2: Empaquetado y parseo de la trama en el Gateway.*

Tabla 9 Historia de Usuario 2: Empaquetado y parseo de la trama en el gateway

HISTORIA DE USUARIO			
Id de historia	HU02	Título:	Empaquetado y parseo de la trama en el gateway
Prioridad:	Alta	Usuario:	Operador técnico
Riesgo de desarrollo:	Alto	Tamaño de la tarea:	Grande
Como:	Operador técnico		
Quiero:	Que el gateway extraiga el mensaje de la trama recibida y reconstruya el sobre de datos en un formato compatible con el servidor.		
Para:	Que el mensaje pueda ser reenviado y procesado sin ambigüedades.		
Criterios de aceptación:	El gateway debe recortar el mensaje por su longitud declarada, convertir su codificación al formato estándar y reconstruir el sobre sin alterar el contenido.		
Dependencias:	Enlace LoRa operativo (HU01).		

4.4.2.1.3 *Historia de Usuario 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP.*

Tabla 10 Historia de Usuario 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP

HISTORIA DE USUARIO			
Id de historia	HU03	Título:	Reenvío de los datos al servidor por HTTP
Prioridad:	Alta	Usuario:	Operador técnico
Riesgo de desarrollo:	Medio	Tamaño de la tarea:	Grande
Como:	Operador técnico		
Quiero:	Que el gateway reenvíe el sobre de datos al servidor por HTTP sobre WiFi.		
Para:	Que las mediciones lleguen al servidor central y queden disponibles para su procesamiento.		
Criterios de aceptación:	El gateway debe verificar la conexión, enviar el sobre al punto de ingesta con su clave de autenticación y recibir un código de respuesta del servidor.		
Dependencias:	Sobre de datos reconstruido (HU02) y conexión WiFi disponible.		

4.4.2.1.4 *Historia de Usuario 4: Transporte seguro y autenticado de la trama.*

Tabla 11 *Historia de Usuario 4: Transporte seguro y autenticación de la trama*

HISTORIA DE USUARIO			
Id de historia	HU04	Título:	Transporte seguro y autenticado de la trama
Prioridad:	Alta	Usuario:	Operador técnico.
Riesgo de desarrollo:	Medio	Tamaño de la tarea:	Mediana
Como:	Operador técnico.		
Quiero:	Que la capa de comunicación transporte la trama protegida sin leerla ni modificarla, y que la petición al servidor viaje autenticada.		
Para:	Preservar la confidencialidad e integridad del dato durante todo su recorrido.		
Criterios de aceptación:	El contenido recibido por el servidor debe coincidir con el enviado por la estación, y la petición debe ser aceptada solo si incluye una clave de autenticación válida.		
Dependencias:	Reenvío HTTP operativo (HU03). El cifrado y descifrado corresponden a otro módulo.		

4.4.2.1.5 *Historia de Usuario 5: Verificación de recepción y calidad del enlace*

Tabla 12 *Historia de Usuario 5: Verificación de recepción y calidad del enlace*

HISTORIA DE USUARIO			
Id de historia	HU05	Título:	Verificación de recepción y calidad del enlace

HISTORIA DE USUARIO			
Prioridad:	Alta	Usuario:	Operador técnico.
Riesgo de desarrollo:	Medio	Tamaño de la tarea:	Mediana
Como:	Operador técnico.		
Quiero:	Conocer la calidad del enlace (RSSI y SNR) y que la comunicación tolere fallos mediante reintentos y recuperación del módulo.		
Para:	Verificar que la transmisión de datos es confiable y estable en las condiciones reales del vivero.		
Criterios de aceptación:	El gateway debe leer los indicadores RSSI y SNR de cada trama, confirmar la recepción mediante el código de respuesta del servidor, reintentar los envíos fallidos y reconfigurar el módulo tras un reinicio.		
Dependencias:	Enlace LoRa y reenvío operativos (HU01–HU03).		

4.4.2.2 Requerimientos funcionales.

- RF01: El sistema debe establecer un enlace LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.
- RF02: El gateway debe recibir las tramas y extraer el mensaje utilizando su longitud declarada.
- RF03: El gateway debe reconstruir el sobre de datos en un formato compatible con el servidor.
- RF04: El gateway debe reenviar el sobre al servidor por HTTP sobre WiFi con autenticación.
- RF05: El gateway debe transportar el contenido protegido sin leerlo ni modificarlo.
- RF06: El gateway debe leer los indicadores de calidad de señal RSSI y SNR de cada trama.
- RF07: El sistema debe reintentar los envíos fallidos y recuperar el módulo ante reinicios.

4.4.2.3 Requerimientos no funcionales.

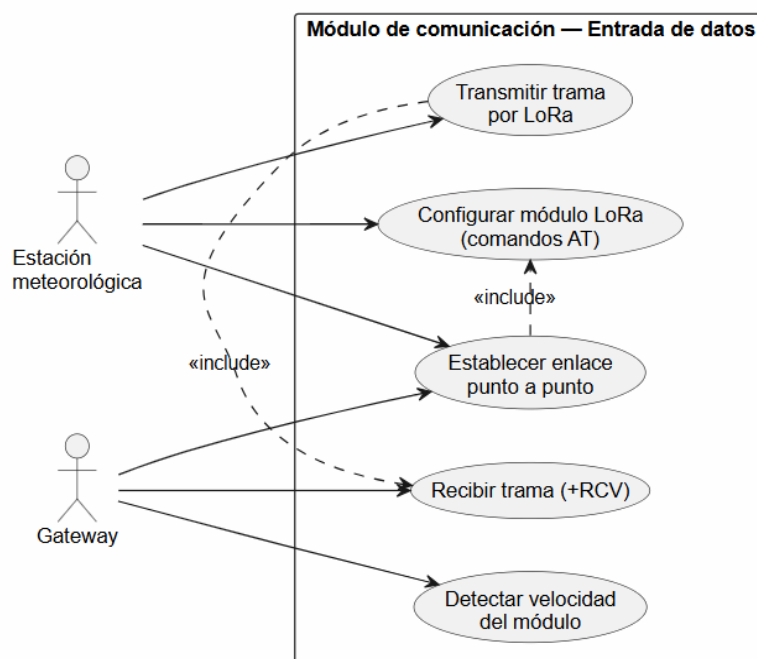
- **RNF01:** El enlace debe operar sin infraestructura de red externa (sin operador ni servidor de red).
- **RNF02:** La configuración de la red WiFi del gateway debe poder realizarse en campo sin recompilar el firmware.
- **RNF03:** La capa de comunicación debe ser independiente del contenido del mensaje (agnóstica al dato).
- **RNF05:** El sistema deberá mantenerse disponible para consulta durante la mayor parte del tiempo de operación.

4.4.3 Diseño del sistema

4.4.3.1 Casos de uso.

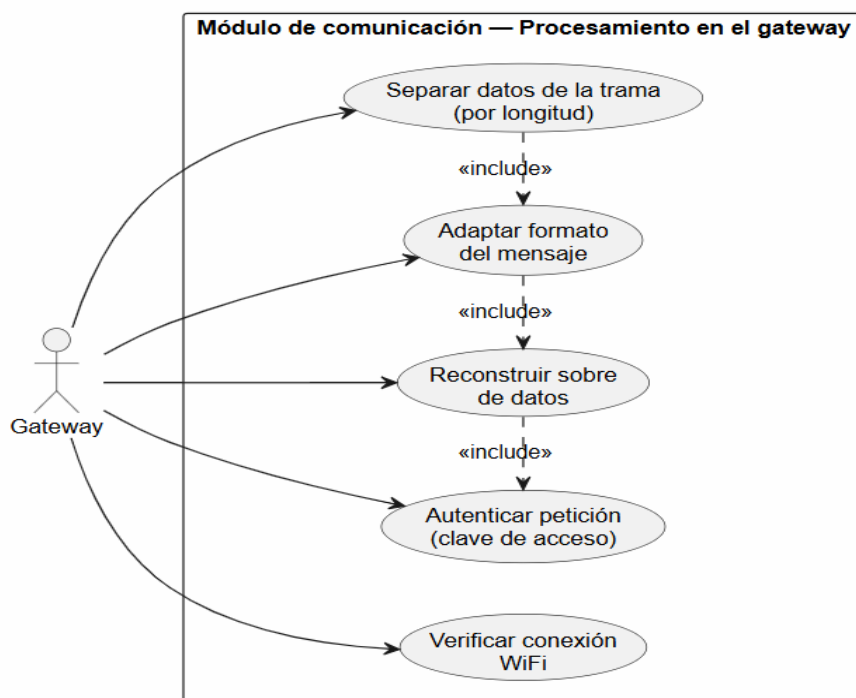
4.4.3.1.1 Caso de uso: Entrada de datos a la capa de comunicación.

Ilustración 3 Diagrama de Entrada: Entrada de datos a la capa de comunicación



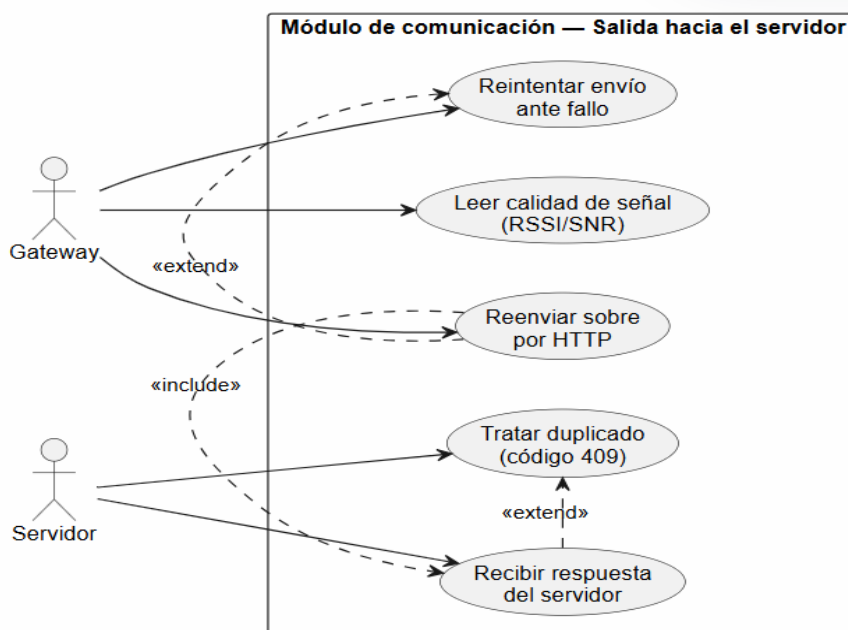
4.4.3.1.2 Caso de uso: Procesamiento en el Gateway.

Ilustración 4 Diagrama de Proceso: en el gateway



4.4.3.1.3 Caso de uso: Salida de datos hacia el servidor.

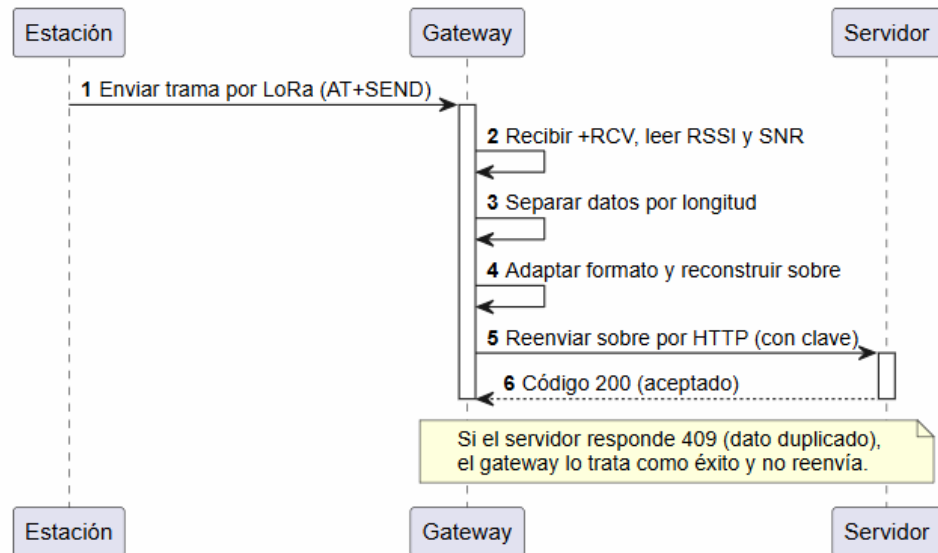
Ilustración 5 Diagrama de Salida: Salida hacia el servidor



4.4.3.2 Diagramas de secuencia.

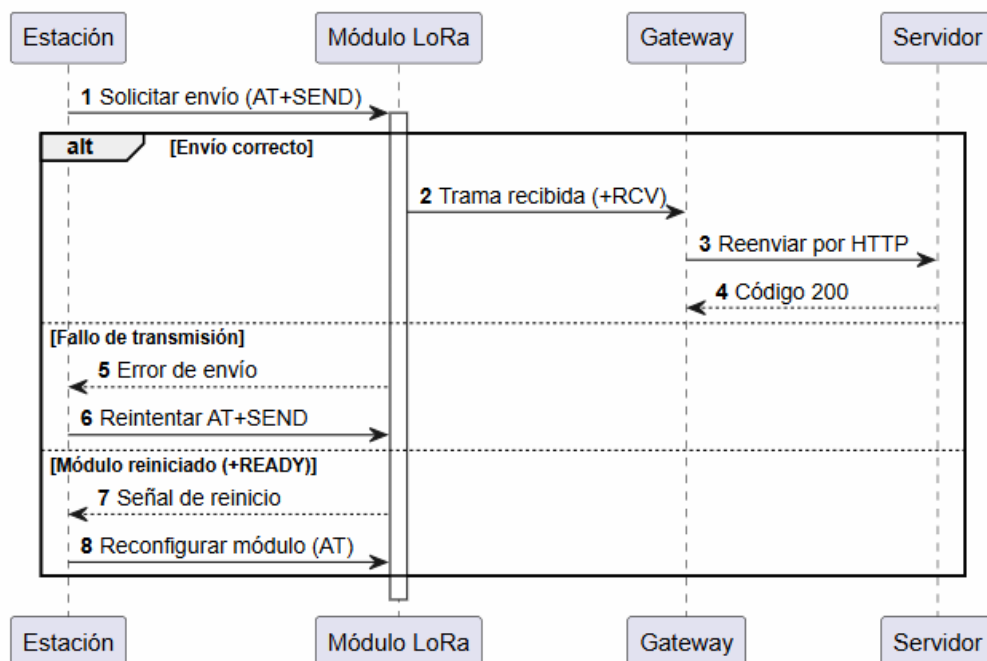
4.4.3.2.1 Diagrama de secuencia: Transmisión de la trama de la estación al servidor.

Ilustración 6 Diagrama de secuencia: Transmisión en la trama de la estación al servidor



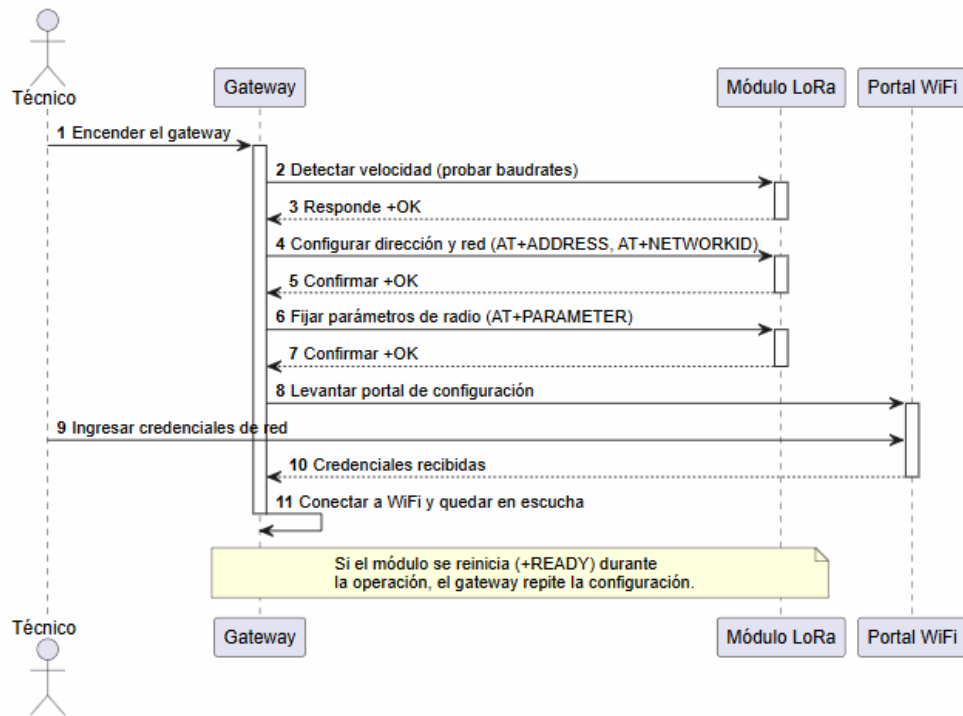
4.4.3.2.2 Diagrama de secuencia: Control de fallos en la comunicación de red.

Ilustración 7 Diagrama de secuencia: Control de fallos en la comunicación de red



4.4.3.2.3 Diagrama de secuencia: Configuración inicial del gateway y el enlace.

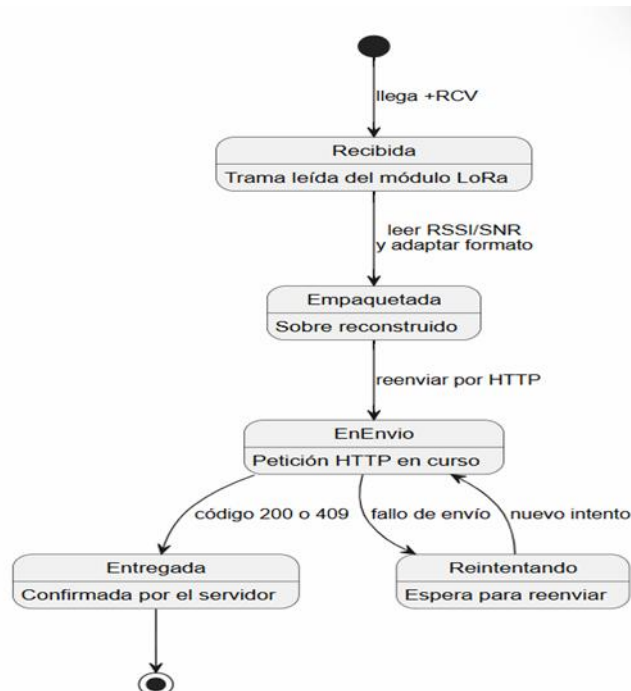
Ilustración 8 Diagrama de secuencia: Configuración inicial del gateway y el enlace



4.4.3.3 Diagramas de Estado.

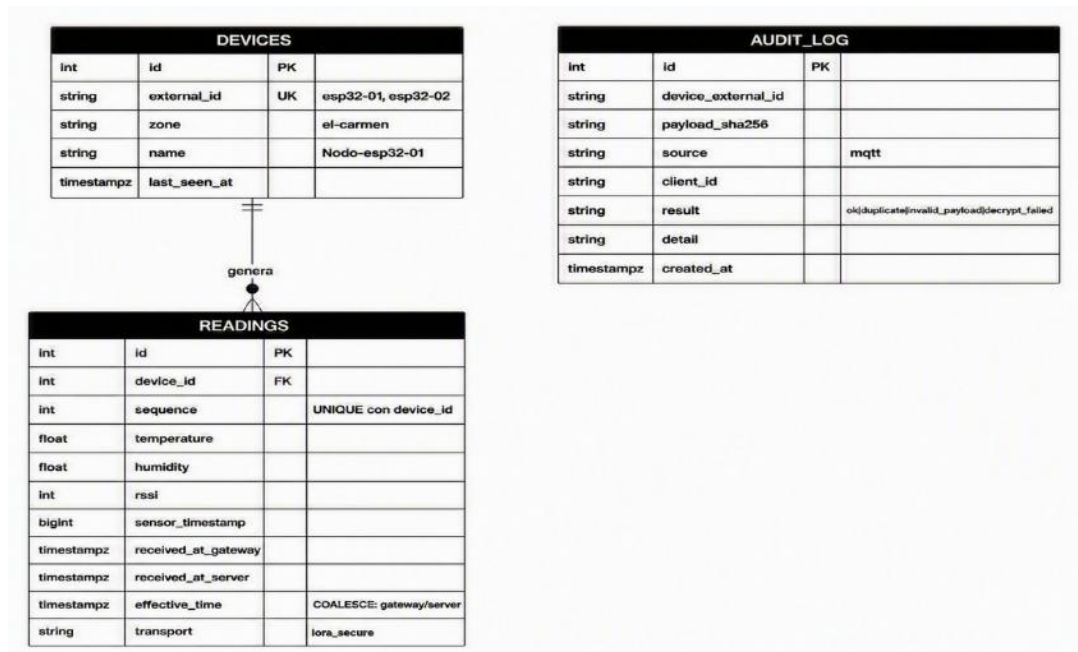
4.4.3.3.1 Diagrama de estado: Trama en la capa de comunicación.

Ilustración 9 Diagrama de estado: Trama en la capa de comunicación



4.4.3.4 Diagrama de Base de Datos.

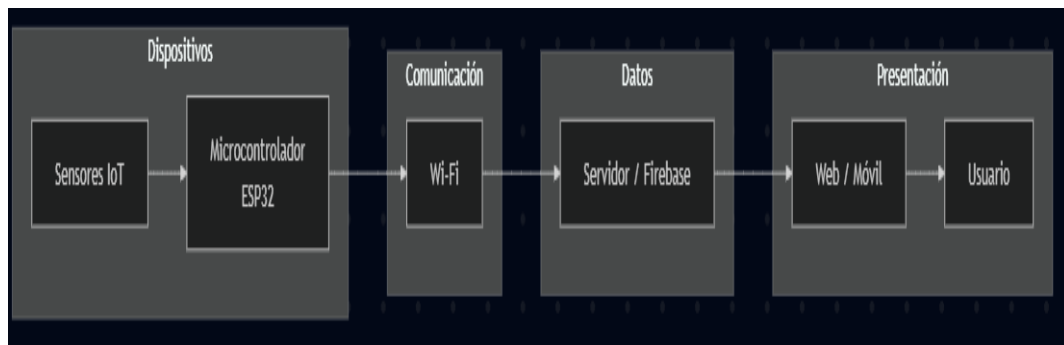
Ilustración 10 Diagrama de la base de Datos



4.4.4 Arquitectura del sistema

4.4.4.1 Arquitectura general.

Ilustración 11 Diagrama de Arquitectura general



El sistema se desarrolla bajo una arquitectura cliente-servidor. Los sensores IoT y el microcontrolador conforman la parte de adquisición de datos, la red Wi-Fi permite la comunicación hacia el servidor, y Firebase Realtime Database actúa como repositorio central. Finalmente, la aplicación web o móvil funciona como capa de presentación para la consulta de la información por parte del usuario final.

4.4.4.2 Tecnologías utilizadas.

Tabla 13 *Tecnologías utilizadas*

Herramienta	Uso dentro del proyecto
Arduino IDE	Se utiliza para programar el microcontrolador ESP32/ESP8266 y cargar el código que permite leer los sensores y enviar los datos.
Lenguaje C/C++	Se emplea en la programación del microcontrolador para controlar los sensores, procesar las lecturas y realizar la transmisión de datos.
ESP32	Actúan como la unidad central del sistema IoT, encargada de capturar la información de los sensores y enviarla al servidor.
Sensores IoT	Permiten medir variables ambientales como temperatura, humedad del suelo y luminosidad.
Firebase Realtime Database	Se utiliza como base de datos en la nube para almacenar y sincronizar en tiempo real las mediciones enviadas por el sistema.
Aplicación web o móvil	Permite visualizar los datos monitoreados, consultar el historial de mediciones y revisar alertas desde un dispositivo autorizado.
HTML, CSS y JavaScript	Se usan para desarrollar la interfaz web de visualización y consulta de datos.
MQTT o protocolo HTTP	Se emplea para la comunicación entre el microcontrolador y el servidor, facilitando el envío de datos.
Google Chrome o navegador web	Sirve para acceder a la plataforma de monitoreo desde computadora o celular.

4.4.5 Roles Scrum

Tabla 14 *Roles del Scrum*

Rol Scrum	Participante(s)	Función principal del proyecto
Product Owner	Representante del Vivero Lastenia Vera	Representa las necesidades del proyecto
Scrum Master	Rómulo Danilo Arévalo Hermida	Garantiza el cumplimiento de la metodología ágil y supervisa que el desarrollo del módulo avance conforme a los objetivos planteados. Además, orienta la resolución de impedimentos

		técnicos o metodológicos que puedan afectar el progreso del proyecto.
Scrum Team	Bryan David López Loo	Desarrolla la lógica de lectura de sensores, empaquetamiento estructurado de datos, transmisión inalámbrica y verificación de la recepción de información dentro del nodo sensor.

4.4.6 Definición de Hecho (DoD)

4.4.6.1 Criterios generales.

- El código fuente deberá compilar correctamente sin errores.
- La funcionalidad que se pone en funcionamiento tiene que satisfacer lo que se explicita en la historia de usuario asociada.
- El módulo que se pone en funcionamiento tiene que integrarse bien con el resto de componentes del sistema.
- La interfaz de usuario tiene que tener un diseño coherente, funcional, sin errores visuales.
- Los datos que capturan los sensores tienen que visualizarse correctamente en la plataforma.
- La transmisión de datos desde el microcontrolador al servidor tiene que suceder sin fallos.
- El almacenamiento de la información en la base de datos deberá realizarse de forma correcta.
- El sistema deberá permitir la consulta de las variables ambientales en tiempo real.

4.4.6.2 Criterios Específicos del Proyecto.

- La captura de datos deberá realizarse únicamente desde los sensores configurados en el sistema.
- El envío de datos deberá ejecutarse solo cuando el microcontrolador detecte una lectura válida.
- El sistema deberá registrar únicamente mediciones completas con fecha y hora.
- La visualización de datos deberá mostrar solo las variables ambientales asociadas al cultivo monitoreado.
- Las alertas deberán activarse únicamente cuando una variable supere o descienda de los rangos establecidos.
- La consulta de información deberá mostrar únicamente registros almacenados en la base de datos.
- La interfaz móvil o web deberá presentar en pantalla los valores más recientes disponibles.
- La sincronización de información deberá actualizar los valores cuando se reciba una nueva lectura.

4.4.7 Product Backlog

Tabla 15 Product Backlog

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
1	Configuración del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.	HU01	Alta	Por hacer
2	Recepción de las tramas ambientales en el gateway y extracción del mensaje.	HU01	Alta	Por hacer
3	Reconstrucción del sobre de datos (empaquetado) a partir de la trama recibida.	HU02	Alta	Por hacer
4	Conversión del formato del mensaje para su compatibilidad con el servidor.	HU02	Alta	Por hacer

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
5	Implementación del canal de reenvío hacia el servidor por HTTP sobre WiFi.	HU03	Alta	Por hacer
6	Configuración de los parámetros del enlace inalámbrico (dirección, red, potencia).	HU03	Alta	Por hacer
7	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	HU04	Alta	Por hacer
8	Manejo de los códigos de respuesta del servidor (aceptado y duplicado).	HU04	Alta	Por hacer
9	Lectura de los indicadores de calidad de señal (RSSI y SNR) en la recepción.	HU05	Media	Por hacer
10	Manejo de errores de transmisión, reintentos y recuperación del módulo.	HU05	Media	Por hacer

4.4.8 Sprint 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto

4.4.8.1 Planificación del Sprint.

Tabla 16 *Sprint 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto*

SPRINT 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto			
Duración:	3 semana (06/01/2026 – 12/01/2026)	Prioridad:	Alta
Objetivo:	Establecer el enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación meteorológica y el gateway, de modo que las mediciones ambientales capturadas por la estación puedan ingresar a la capa de comunicación y quedar disponibles para su posterior reenvío.		
Historias de usuario:	HU01: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.		
Tareas de desarrollo:	- Configuración de los módulos LoRa Reyax mediante comandos AT en la estación y el gateway. - Asignación de la dirección de nodo y del identificador de red compartido por ambos extremos. - Detección automática de la velocidad de comunicación (baudrate) del módulo. - Recepción de las tramas en el gateway y verificación de la lectura correcta del mensaje. - Pruebas funcionales de establecimiento del enlace punto a punto.		
Plan de entrega:	Configuración de los módulos LoRa. - Se establecieron los parámetros de dirección, red y modulación en ambos módulos Reyax mediante comandos AT.		

SPRINT 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto	
	• Tiempo de desarrollo: 8 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 06/01/2026 - 08/01/2026. • Establecimiento del enlace punto a punto. • Se verificó que la estación (dirección 1) y el gateway (dirección 2) intercambiaran tramas dentro de la misma red. • Tiempo de desarrollo: 12 horas • Fecha de Inicio y Fecha Final: 09/01/2026 - 13/01/2026. • Recepción y lectura del mensaje. • Se comprobó que el gateway recibiera la trama y extrajera el mensaje sin pérdida de información. • Tiempo de desarrollo: 20 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 14/01/2026 - 20/01/2026.

4.4.8.2 Sprint Backlog: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.

Tabla 17 Producto Backlog1

Historia de usuario.	Tarea	Duración estimada
HU01	Configuración de los módulos LoRa Reyax mediante comandos AT.	8 horas
HU01	Asignación de la dirección de nodo y del identificador de red compartido.	6 horas
HU01	Detección automática de la velocidad de comunicación del módulo.	8 horas
HU01	Recepción de las tramas en el gateway y lectura del mensaje.	10 horas

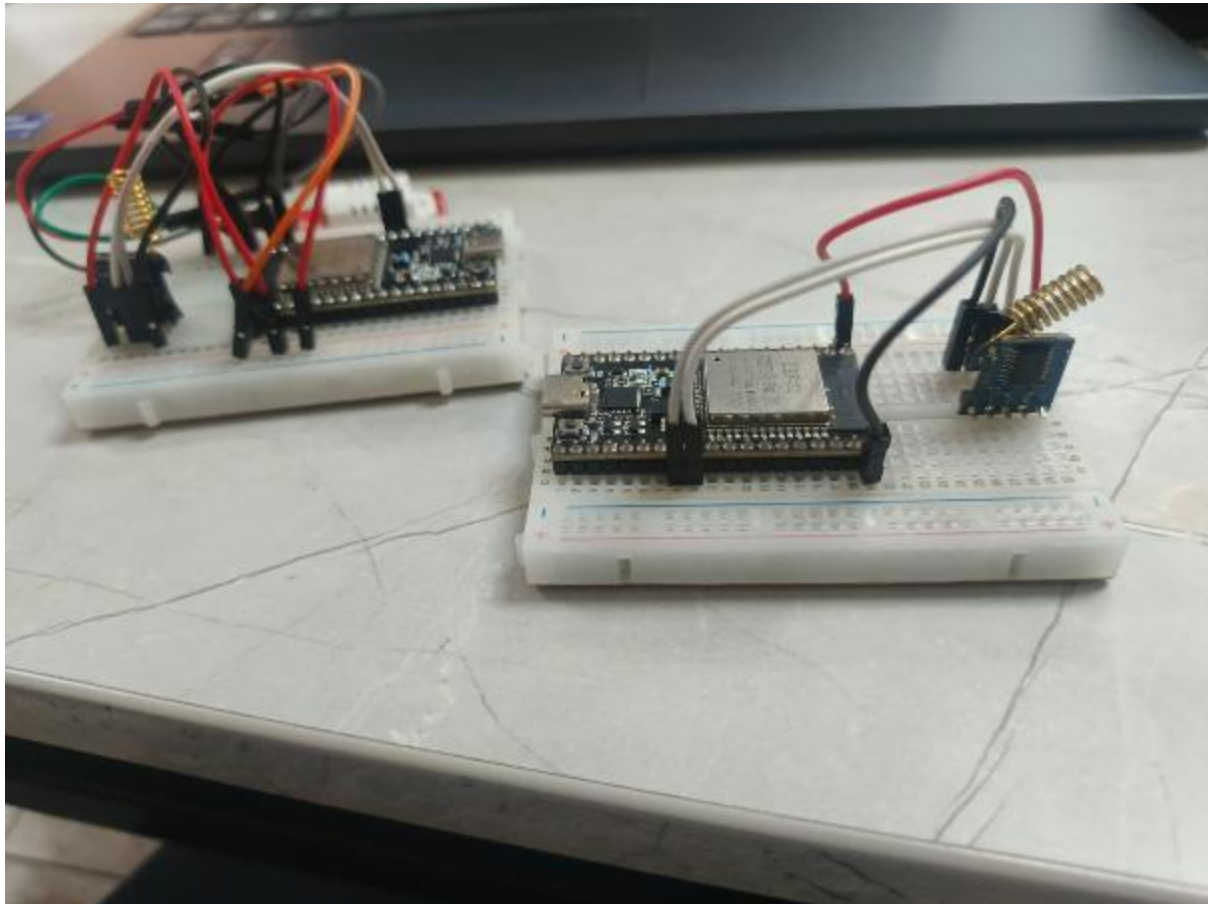
4.4.8.3 Desarrollo del Sprint.

4.4.8.3.1 Funcionalidad de Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.

En este sprint se implementó la base de la capa de comunicación: el enlace LoRa punto a punto entre la estación y el gateway. La estación transmite las mediciones ambientales mediante el comando AT+SEND dirigido a la dirección del gateway, y el gateway las recibe como tramas del tipo +RCV. Antes de operar, ambos módulos se configuran con la misma dirección de red y con los mismos parámetros de modulación para garantizar que puedan

comunicarse. También se implementó una rutina que detecta automáticamente la velocidad del puerto del módulo, lo que evita tener que conocer de

Ilustración 12 Montaje de la estación y el gateway con sus módulos LoRa



Este fragmento permite obtener los valores de temperatura, humedad y luminosidad desde los sensores conectados al microcontrolador. La información capturada constituye la base del proceso de empaquetamiento y transmisión de datos ambientales.

4.4.8.4 Sprint Review.

4.4.8.4.1 *Sprint 1: Establecimiento del enlace LoRa punto a punto.*

En este primer sprint se desarrolló el enlace de comunicación LoRa punto a punto que permite que los datos capturados por la estación ingresen a la capa de comunicación a través del gateway. Con ello se estableció el primer tramo del recorrido del dato, desde el nodo de campo hasta el punto de reenvío.

Ilustración 13 Configuración de los módulos LoRa

```

71 void LoRaManager::begin() {
72     static const unsigned long baudrates[] = {115200, 57600, 38400, 19200, 9600, 4800};
73     static const size_t baudCount = sizeof(baudrates) / sizeof(baudrates[0]);
74
75     unsigned long detectedBaud = 0;
76
77     Serial.println("[LoRa] Iniciando autodetección de baudrate...");
78
79     for (size_t i = 0; i < baudCount; i++) {
80         const unsigned long baud = baudrates[i];
81
82         Serial.begin(baud, SERIAL_8N1, LORA_RX, LORA_TX);
83         delay(500);
84         flushTx();
85
86         const char* probe = "AT\r\n";
87         serial->write(reinterpret_cast<const uint8_t*>(probe), 4);
88         serial->flush();
89
90         String response;
91         const unsigned long start = millis();
92         while (millis() - start < 500) {
93             while (serial->available()) {
94                 response += static_cast<char>(serial->read());
95             }
96             delay(1);
97         }
98
99         Serial.printf("[LoRa] Proba %lu bps -> '%s'\n", baud, response.c_str());
100
101         if (response.indexOf("+OK") > 0 ||
102             response.indexOf("+READY") > 0 ||
103             response.indexOf("+AT") > 0) {
104             detectedBaud = baud;
105             Serial.printf(">>> BAUDRATE DETECTADO: %lu <<<\n", detectedBaud);
106             break;
107         }
108     }

```

- **Retroalimentación recibida**

En la revisión se indicó que debía comprobarse la estabilidad del enlace cuando el módulo se reinicia de forma inesperada y que se documentase con mayor claridad la diferencia entre la configuración del gateway y la de la estación.

- **Mejoras realizadas**

A partir de la retroalimentación se incorporó una rutina de recuperación que reconfigura el módulo cuando este se reinicia durante la operación, y se documentó de forma separada la configuración de cada extremo del enlace. A su vez, se incorporan capturas mejor obtenidas del proceso de establecimiento de la comunicación.

4.4.8.5 Pruebas de Sprint.

4.4.8.5.1 Pruebas de Caja Negra.

- **Pruebas Establecimiento del enlace LoRa punto a punto**

Tabla 18 Pruebas de caja blanca Sprint 1

Nro.	Entrada	Salida	Resultado
1	Módulos configurados con el mismo identificador de red	La estación y el gateway se comunican entre sí	Pasa

Nro.	Entrada	Salida	Resultado
2	La estación ejecuta el comando de envío	El gateway recibe la trama +RCV completa	Pasa
3	Comando AT de configuración enviado al módulo	El módulo responde +OK confirmando la orden	Pasa
4	Módulo con velocidad de comunicación desconocida	La rutina detecta la velocidad correcta (115200 bps)	Pasa

4.4.8.5.2 Pruebas de Caja Blanca

- **Pruebas Establecimiento del enlace LoRa punto a punto**

Tabla 19 Pruebas de caja negra Sprint 1

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Detección automática de la velocidad del módulo (detectBaudrate)	Probar las distintas velocidades de comunicación, de la más alta a la más baja, hasta encontrar la que responde	Detectó correctamente 115200 bps y mostró el mensaje de confirmación	Permite conectar el módulo sin saber de antemano su velocidad configurada
Configuración de la dirección y la red del módulo (sendCmd con AT+ADDRESS y AT+NETWORKID)	Asignar a cada módulo su número de nodo y su número de red, y confirmar que aceptó la orden	El módulo respondió +OK en cada comando de configuración	Si los dos módulos no están en la misma red, no se comunican
Recuperación tras un reinicio del módulo (recoverFromReset)	Detectar cuando el módulo se reinició solo y volver a configurarlo automáticamente	El módulo se reconfiguró y retomó la operación sin intervención	Da estabilidad cuando el módulo se apaga y prende por bajones de corriente

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Recepción de la trama de datos (lectura del +RCV)	Detectar cuando llega un mensaje por radio y activar su lectura	Se recibió la trama +RCV con su contenido completo	Es la puerta de entrada de los datos al gateway

4.4.8.6 Incremento y Entregables del Sprint.

Sprint 1: Captura automática de datos ambientales

Se completaron satisfactoriamente las siguientes funcionalidades:

- Configuración de los módulos LoRa Reyax en la estación y el gateway.
- Establecimiento del enlace punto a punto entre ambos nodos.
- Detección automática de la velocidad de comunicación del módulo.
- Recepción de las tramas ambientales en el gateway.
- Rutina de recuperación del módulo ante reinicios inesperados.

4.4.8.7 Estado actual del Producto Backlog.

Tabla 20 Estado actual de Product Backlog1

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
1	Configuración del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.	HU01	Alta	Completada
2	Recepción de las tramas ambientales en el gateway y extracción del mensaje.	HU01	Alta	Completada
3	Reconstrucción del sobre de datos (empaquetado) a partir de la trama recibida.	HU02	Alta	Por hacer
4	Conversión del formato del mensaje para su compatibilidad con el servidor.	HU02	Alta	Por hacer
5	Implementación del canal de reenvío hacia el servidor por HTTP sobre WiFi.	HU03	Alta	Por hacer
6	Configuración de los parámetros del enlace inalámbrico (dirección, red, potencia).	HU03	Alta	Por hacer

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
7	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	HU04	Alta	Por hacer
8	Manejo de los códigos de respuesta del servidor (aceptado y duplicado).	HU04	Alta	Por hacer
9	Lectura de los indicadores de calidad de señal (RSSI y SNR) en la recepción.	HU05	Media	Por hacer
10	Manejo de errores de transmisión, reintentos y recuperación del módulo.	HU05	Media	Por hacer

4.4.9 Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway

4.4.9.1 Planificación del Sprint.

Tabla 21 Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway

SPRINT 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway.			
Duración:	3 semana (06/01/2026 – 12/01/2026)	Prioridad:	Alta
Objetivo:	Reconstruir en el gateway el sobre de datos a partir de la trama LoRa recibida, organizando la información en un formato estructurado y adaptando su codificación para que sea compatible con el servidor, sin modificar el contenido del mensaje.		
Historias de usuario:	HU02: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway		
Tareas de desarrollo:	- Extracción del mensaje de la trama +RCV usando el campo de longitud declarada. - Conversión del mensaje desde el formato de la estación al formato estándar esperado por el servidor. - Reconstrucción del sobre de datos con sus campos de versión, identificador de dispositivo y algoritmo. - Validación de la coherencia de la estructura generada antes del reenvío. - Pruebas del empaquetamiento sobre tramas reales.		
Plan de entrega:	Extracción del mensaje. - Se implementó el recorte del mensaje usando la longitud declarada en la trama para evitar errores cuando el contenido incluye comas. - Tiempo de desarrollo: 8 horas. - Fecha de Inicio y Fecha Final: 06/01/2026 - 08/01/2026. Conversión del formato. - Se desarrolló la conversión del alfabeto de codificación de la estación al estándar que admite el servidor.		

SPRINT 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway.	
	• Tiempo de desarrollo: 12 horas • Fecha de Inicio y Fecha Final: 09/01/2026 - 13/01/2026. • Reconstrucción y validación del sobre. • Se rearmó el sobre estructurado y se validó su coherencia antes de su envío. • Tiempo de desarrollo: 20 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 14/01/2026 - 20/01/2026.

4.4.9.2 Sprint Backlog: Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway.

Tabla 22 Sprint Backlog2

Historia de usuario.	Tarea	Duración estimada
HU02	Extracción del mensaje de la trama mediante el campo de longitud declarada.	4 horas
HU02	Conversión del formato de codificación para compatibilidad con el servidor.	7 horas
HU02	Configuración del intervalo de medición cada 15 minutos	8 horas
HU02	Reconstrucción del sobre estructurado con sus campos.	2 horas
HU02	Pruebas de generación y validación de la trama empaquetada.	21 horas

4.4.9.3 Desarrollo del Sprint.

4.4.9.3.1 Funcionalidad de Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway.

En este sprint se implementó el empaquetamiento del mensaje en el gateway. Cuando llega una trama +RCV, el gateway extrae el mensaje utilizando la longitud declarada en la propia trama, en lugar de buscar separadores, lo que evita errores cuando el contenido incluye comas. A continuación, el mensaje se convierte del formato de codificación empleado por la estación al formato estándar que admite el servidor, y se reconstruye el sobre de datos con sus campos de versión, identificador de dispositivo y algoritmo. El gateway reorganiza así el

continente del mensaje, pero nunca modifica ni interpreta el contenido de la medición, que permanece protegido.

Ilustración 14 *Procesamiento del sobre de datos en el Gateway*

```
133 // == Parsing del RCV ==
134 // Formato: <RCV><addr>,<length>,<data>,<rssI>,<snr>
135 // <data> es JSON con comas, por eso se usa <length> para recortarlo exacto.
136 // Retorno true si extrajo un sobre válido en 'sobreOut'.
137 bool parseRCV(const String& line, String& sobreOut, int& rssIOut, int& snrOut) {
138     int eq = line.indexOf(' ');
139     if (eq < 0) {
140         return false;
141     }
142
143     // Primera coma = fin de addr
144     int c1 = line.indexOf(',', eq + 1);
145     if (c1 < 0) {
146         return false;
147     }
148
149     // Segunda coma = fin de length
150     int c2 = line.indexOf(',', c1 + 1);
151     if (c2 < 0) {
152         return false;
153     }
154
155     int length = line.substring(c1 + 1, c2).toInt();
156     if (length <= 0 || length >= 4096) {
157         Serial.print("[RCV] Longitud inválida: %d\n", length);
158         return false;
159     }
160
161     // El sobre son exactamente 'length' caracteres tras la segunda coma
162     int dataStart = c2 + 1;
163     if (dataStart + length > (int)line.length()) {
164         Serial.println("[RCV] Línea mas corta que length declarado.");
165         return false;
166     }
167
168     sobreOut = line.substring(dataStart, dataStart + length);
169
170     // tras el sobre viene "<rssI>,<snr>" (opcional)
171     rssIOut = 0;
172     snrOut = 0;
173     int afterData = dataStart + length;
174     if (afterData < (int)line.length() && line.charAt(afterData) == ',') {
175         int c4 = line.indexOf(',', afterData + 1);
176         if (c4 > 0) {
177             rssIOut = line.substring(afterData + 1, c4).toInt();
178             snrOut = line.substring(c4 + 1).toInt();
179         }
180     }
181
182     return true;
183 }
```

Esta estructura define la forma en que las variables ambientales son agrupadas dentro de una misma trama de datos. Su uso permite organizar la información en un formato compacto y adecuado para su transmisión hacia el servidor.

4.4.9.4 Sprint Review.

4.4.9.4.1 *Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway.*

En este segundo sprint se desarrolló el empaquetamiento estructurado del mensaje dentro del gateway. La información recibida por radio se reorganiza en un sobre de datos con un formato definido y compatible con el servidor, lo que garantiza que el mensaje pueda ser reenviado y posteriormente procesado sin ambigüedades.

Ilustración 15 Sobre de datos reconstruido en el Gateway

```
296     if (parseRCV(line, contenido, rssi, snr)) {
297         Serial.print("[RCV] Payload URL-safe (recibido): ");
298         Serial.println(contenido);
299         Serial.printf("[RCV] RSSI=%d SNR=%d\n", rssi, snr);
300
301         const String payloadStd = urlSafeB64ToStandard(contenido);
302         Serial.print("[RCV] Payload base64 estandar (convertido): ");
303         Serial.println(payloadStd);
304
305         String sobre = String("{\"v\":1,\"deviceId\":\"\" + DEVICE_ID +
306             "\",\"alg\":\"\" + ALG +
307             "\",\"payload\":\"\" + payloadStd + \"\"}");
308
309         Serial.print("[RCV] Sobre reconstruido: ");
310         Serial.println(sobre);
311
312         if (enviarAlBackend(sobre)) {
313             Serial.println(">>> ENVIO AL BACKEND: EXITO <<<");
314         } else {
315             Serial.println(">>> ENVIO AL BACKEND: FALLO <<<");
316         }
317     }
```

Además, se evidencia la conversión del formato aplicada al mensaje, asegurando su compatibilidad con el servidor de destino. Esta verificación permitió comprobar que el contenido recibido por radio fue procesado sin alterar la información de la medición.

- **Retroalimentación recibida**

Durante la revisión se observó la necesidad de asegurar que el empaquetamiento no alterara el contenido protegido del mensaje y de verificar el comportamiento ante tramas cuyo contenido incluyera caracteres especiales.

- **Mejoras realizadas**

A partir de la retroalimentación se reforzó el recorte del mensaje por longitud declarada para tolerar contenidos con comas, y se verificó que el sobre reconstruido conservara intacto el contenido de la medición. Se añadieron capturas que muestran con claridad la estructura del sobre generado.

4.4.9.5 Pruebas de Sprint.

4.4.9.5.1 Pruebas de Caja Negra.

- **Pruebas Empaquetado y parseo en la trama en el gateway**

Tabla 23 Pruebas de Caja Blanca Empaquetado y parseo en la trama en el gateway

Nro.	Entrada	Salida	Resultado
1	Trama +RCV recibida en el gateway	Se separan los campos y se aísla el mensaje	Pasa
2	Longitud declarada en la trama	El mensaje se recorta según esa longitud	Pasa
3	Mensaje en formato URL-safe	Se convierte al formato estándar del servidor	Pasa
4	Sobre reconstruido	Contiene los campos versión, dispositivo, algoritmo y contenido	Pasa
5	Mensaje vacío o corrupto	El gateway no arma el sobre ni continúa el reenvío	Pasa

4.4.9.5.2 Pruebas de Caja Blanca.

- **Pruebas Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway**

Tabla 24 Pruebas de Caja Negra Empaquetado y parseo en la trama en el Gateway

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Separación de los datos del mensaje recibido (parseRCV)	Separar dirección, longitud, mensaje, RSSI y SNR usando la longitud para recortar el mensaje exacto.	Se separaron correctamente los campos de la trama	Recortar por longitud y no por comas evita romper el análisis cuando el mensaje contiene comas.
Adaptación del formato del mensaje (urlSafeB64ToStandard)	Convertir el alfabeto de codificación de la estación al estándar y reponer el relleno faltante.	El mensaje se convirtió al formato que admite el servidor	Sin este ajuste el servidor no puede interpretar el mensaje

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Construcción del sobre JSON	Volver a montar el mensaje con sus etiquetas (versión, dispositivo, algoritmo) sin tocar el contenido	El sobre se armó con todos sus campos y sin alterar el payload	El gateway reorganiza el continente, nunca el contenido
Validación de longitud de trama	Comprobar que el mensaje tenga un tamaño lógico antes de seguir	Se descartaron las tramas con longitud inválida	Evita reenviar mensajes dañados

4.4.9.6 Incremento y Entregables del Sprint.

Sprint 2: Empaquetado y parseo en la trama en el gateway

Se completaron satisfactoriamente las siguientes funcionalidades:

- Extracción del mensaje de la trama mediante la longitud declarada.
- Conversión del formato de codificación para compatibilidad con el servidor.
- Reconstrucción del sobre de datos estructurado.
- Validación de la coherencia de la estructura antes del reenvío.

4.4.9.7 Estado actual del Product Backlog.

Tabla 25 Estado actual del Product Backlog2

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
1	Configuración del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.	HU01	Alta	Completado
2	Recepción de las tramas ambientales en el gateway y extracción del mensaje.	HU01	Alta	Completado
3	Reconstrucción del sobre de datos (empaquetado) a partir de la trama recibida.	HU02	Alta	Completado
4	Conversión del formato del mensaje para su compatibilidad con el servidor.	HU02	Alta	Completado

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
5	Implementación del canal de reenvío hacia el servidor por HTTP sobre WiFi.	HU03	Alta	Por hacer
6	Configuración de los parámetros del enlace inalámbrico (dirección, red, potencia).	HU03	Alta	Por hacer
7	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	HU04	Alta	Por hacer
8	Manejo de los códigos de respuesta del servidor (aceptado y duplicado).	HU04	Alta	Por hacer
9	Lectura de los indicadores de calidad de señal (RSSI y SNR) en la recepción.	HU05	Media	Por hacer
10	Manejo de errores de transmisión, reintentos y recuperación del módulo.	HU05	Media	Por hacer

4.4.9.8 Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP.

4.4.9.9 Planificación del Sprint.

Tabla 26 Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP

SPRINT 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP			
Duración:	3 semana (06/01/2026 – 12/01/2026)	Prioridad:	Alta
Objetivo:	Implementar en el gateway el reenvío del sobre de datos hacia el servidor central mediante peticiones HTTP sobre WiFi, garantizando que el mensaje llegue a su destino de forma confiable y autenticada.		
Historias de usuario:	HU03: Reenvío de los datos al servidor por HTTP		
Tareas de desarrollo:	- Configuración de la conexión WiFi del gateway mediante portal de configuración. - Implementación de la petición HTTP hacia el punto de ingesta del servidor. - Incorporación de la clave de autenticación en la cabecera de la petición. - Verificación de la conectividad antes de intentar el envío. - Pruebas de estabilidad de la transmisión hacia el servidor.		
Plan de entrega:	Configuración de la conexión WiFi. - Se implementó un portal de configuración que permite establecer las credenciales de red sin recompilar el firmware. - Tiempo de desarrollo: 8 horas. - Fecha de Inicio y Fecha Final: 06/01/2026 - 08/01/2026.		

SPRINT 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP	
	• Implementación del envío HTTP. • Se programó la petición hacia el punto de ingesta del servidor, incluyendo la clave de autenticación en la cabecera. • Tiempo de desarrollo: 12 horas • Fecha de Inicio y Fecha Final: 09/01/2026 - 13/01/2026. • Pruebas de estabilidad. • Se verificó el envío continuo de sobres y la correcta llegada al servidor. • Tiempo de desarrollo: 20 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 14/01/2026 - 20/01/2026.

4.4.9.10 Sprint Backlog: Reenvío de los datos al servidor por HTTP

Tabla 27 Sprint Backlog 3

Historia de usuario.	Tarea	Duración estimada
HU03	Configuración de la conexión WiFi mediante portal de configuración.	8 horas
HU03	Implementación de la petición HTTP hacia el punto de ingesta del servidor.	10 horas
HU03	Incorporación de la clave de autenticación en la cabecera.	6 horas
HU03	Pruebas de estabilidad de la transmisión.	8 horas

4.4.9.11 Desarrollo del Sprint.

4.4.9.11.1 Funcionalidad de Reenvío de los datos al servidor por HTTP.

En este sprint se implementó el reenvío del sobre de datos desde el gateway hacia el servidor mediante una petición HTTP sobre WiFi. El gateway comprueba primero que tenga conexión a la red; si la tiene, abre la conexión hacia el punto de ingesta del servidor, adjunta la clave de autenticación en la cabecera de la petición y envía el sobre. Para facilitar la puesta en marcha en campo, la configuración de la red WiFi se realiza mediante un portal de

configuración, de modo que se pueden cambiar las credenciales sin modificar el código. De esta manera se completó el segundo tramo del recorrido del dato: desde el gateway hasta el servidor

Ilustración 16 Petición HTTP con la clave de autenticación

```
207 // — Envío HTTP POST al backend —————
208 // Retorna true si el backend acepta (200) o reporta duplicado (409).
209 bool enviarAlBackend(const String& sobreJson) {
210     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
211         Serial.println("[HTTP] WiFi no conectado. No se envia.");
212         return false;
213     }
214
215     WiFiClientSecure client;
216     client.setInsecure(); // no validamos cert: el tunel es HTTPS y el dato ya va cifrado AES-GCM
217
218     HTTPClient http;
219     if (!http.begin(client, BACKEND_URL)) {
220         Serial.println("[HTTP] No se pudo iniciar la conexion.");
221         return false;
222     }
223
224     http.addHeader("Content-Type", "application/json");
225     http.addHeader("X-API-Key", API_KEY);
226
227     int code = http.POST(sobreJson);
228     String respuesta = http.getString();
229
230     Serial.printf("[HTTP] Código: %d\n", code);
231     Serial.print("[HTTP] Respuesta: ");
232     Serial.println(respuesta);
233
234     http.end();
235
236     return code == 200 || code == 409;
237 }
```

Este código ejecuta el envío de la trama empaquetada a través del módulo de comunicación inalámbrica. De esta manera, los datos ambientales pueden ser transportados desde el nodo sensor hacia el servidor central para su posterior procesamiento.

4.4.9.12 Sprint Review.

4.4.9.12.1 Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP.

En este tercer sprint se desarrolló la transmisión del sobre de datos al servidor mediante HTTP sobre WiFi. Con esta funcionalidad, la información recibida por radio y empaquetada

en el gateway llega finalmente al servidor central, donde queda disponible para su procesamiento y almacenamiento.

Ilustración 17 Portal de configuración de la red WiFi del Gateway

```
182 // — WiFi con portal de configuración editable —————
183 void setupWifi() {
184     WiFiManager wm;
185
186     // Botón BOOT (GPIO 0) presionado al arrancar → borrar credenciales
187     pinMode(RESET_WIFI_PIN, INPUT_PULLUP);
188     delay(50);
189     if (digitalRead(RESET_WIFI_PIN) == LOW) {
190         Serial.println("[WiFi] Boton BOOT presionado: borrando credenciales guardadas...");
191         wm.resetSettings();
192     }
193
194     wm.setConfigPortalTimeout(180); // 3 min; luego reintenta/reinicia
195
196     Serial.println("[WiFi] Conectando (o abriendo portal de configuración)...");
197     Serial.printf("[WiFi] Si no hay red guardada, conectate al AP '%s' (clave: %s) desde el telefono.\n",
198                 AP_NAME, AP_PASSWORD);
199
200     // autoConnect: usa credenciales guardadas; si fallan, levanta el portal AP.
201     bool connected = wm.autoConnect(AP_NAME, AP_PASSWORD);
202
203     if (!connected) {
204         Serial.println("[WiFi] No se pudo conectar ni configurar. Reiniciando...");
205         delay(3000);
206         ESP.restart();
207     }
208
209     Serial.print("[WiFi] Conectado. IP: ");
210     Serial.println(WiFi.localIP());
211 }
```

En la siguiente evidencia se observa, primero, el portal de configuración de la red Wi-Fi del gateway, donde se ingresaron los parámetros necesarios para establecer la conexión con el servidor. Esta configuración fue indispensable para permitir el reenvío de los datos ambientales desde el gateway hacia la plataforma central.

- **Retroalimentación recibida**

Durante la revisión se indicó que debía contemplarse el comportamiento del gateway cuando no hubiera conexión de red y aclararse cómo se maneja la respuesta del servidor cuando un dato ya había sido recibido previamente.

- **Mejoras realizadas**

A partir de la retroalimentación se añadió la verificación de conexión antes de cada envío y se documentó el tratamiento de las respuestas del servidor, incluyendo el caso en que

un dato ya existía. Se incorporaron capturas que muestran el resultado del envío en el monitor serial.

4.4.9.13 Pruebas del Sprint.

4.4.9.13.1 Pruebas de Caja Negra.

- **Pruebas Reenvío de los datos al servidor por HTTP**

Tabla 28 Pruebas de Caja Blanca: Reenvío de los datos al servidor por HTTP

Nro.	Entrada	Salida	Resultado
1	El gateway tiene conexión WiFi disponible	Intenta el envío del sobre al servidor	Pasa
2	Petición HTTP con cabecera de autenticación	El servidor responde con código 200 (aceptado)	Pasa
3	Clave de autenticación válida en la cabecera	La petición es aceptada por el servidor	Pasa
4	Dato ya existente en el servidor	El servidor responde duplicado y el gateway lo trata como éxito	Pasa
5	El gateway no tiene conexión de red	No intenta el envío y lo notifica por el serial	Pasa

4.4.9.13.2 Pruebas de Caja Blanca

- **Pruebas Reenvío de los datos al servidor por HTTP**

Tabla 29 Pruebas de Caja Blanca Reenvío de los datos al servidor por HTTP

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Envío del dato al servidor (enviarAlBackend)	Revisar que haya internet, abrir la conexión con el servidor, adjuntar la clave de acceso y mandar el mensaje	La petición se envió y el servidor respondió con código 200	Si no hay red, no intenta el envío.

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Manejo del código de respuesta	Tratar como éxito tanto la aceptación como la indicación de duplicado.	Se interpretaron correctamente ambos códigos como éxito	Reenviar un dato duplicado sería innecesario.
Configuración WiFi por portal	Levantar un portal para capturar las credenciales de red.	El portal permitió configurar la red sin recompilar	Permite configurar el gateway en campo sin recompilar.
Verificación de conexión	Comprobar el estado de la red antes de cada envío.	Se verificó la conexión antes de transmitir	Evita errores al intentar transmitir sin conectividad.

4.4.9.14 Incremento y Entregables del Sprint.

Sprint 3: Reenvío de los datos al servidor por HTTP

Se completaron satisfactoriamente las siguientes funcionalidades:

- Configuración de la red WiFi del gateway mediante portal de configuración.
- Implementación del reenvío del sobre por HTTP hacia el servidor.
- Autenticación de la petición mediante clave en la cabecera.
- Verificación de conexión antes del envío.
- Tratamiento de las respuestas de aceptación y de duplicado.

4.4.9.15 Estado actual del Product Backlog

Tabla 30 Estado actual del Product Backlog3

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
1	Configuración del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.	HU01	Alta	Completado
2	Recepción de las tramas ambientales en el gateway y extracción del mensaje.	HU01	Alta	Completado
3	Reconstrucción del sobre de datos (empaquetado) a partir de la trama recibida.	HU02	Alta	Completado

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
4	Conversión del formato del mensaje para su compatibilidad con el servidor.	HU02	Alta	Completado
5	Implementación del canal de reenvío hacia el servidor por HTTP sobre WiFi.	HU03	Alta	Completado
6	Configuración de los parámetros del enlace inalámbrico (dirección, red, potencia).	HU03	Alta	Completado
7	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	HU04	Alta	Por hacer
8	Manejo de los códigos de respuesta del servidor (aceptado y duplicado).	HU04	Alta	Por hacer
9	Lectura de los indicadores de calidad de señal (RSSI y SNR) en la recepción.	HU05	Media	Por hacer
10	Manejo de errores de transmisión, reintentos y recuperación del módulo.	HU05	Media	Por hacer

4.4.9.16 Sprint 4: Transporte seguro y autenticado de la trama.

4.4.9.16.1 Planificación del Sprint.

Tabla 31 Sprint 4: Transporte y autenticación de la trama

SPRINT 4: Transporte y autenticado de la trama			
Duración:	3 semana (06/01/2026 – 12/01/2026)	Prioridad:	Alta
Objetivo:	Garantizar que la capa de comunicación transporte la trama protegida desde la estación hasta el servidor sin alterar ni interpretar su contenido, y que la petición hacia el servidor viaje autenticada.		
Historias de usuario:	HU04: Transporte seguro y autenticado de la trama.		
Tareas de desarrollo:	- Logística del contenido protegido sin efectuar descifrado ni modificación de ningún punto de la capa. - Preservación del contenido del mensaje de forma íntegra durante el empaquetado del mensaje y el reenvío del mensaje. - Verificación de la petición hacia el servidor mediante clave en la cabecera. - Uso de una conexión de transporte hacia el servidor del VPK.. - Pruebas de que el contenido llega al servidor sin alteraciones.		
Plan de entrega:	Transporte del contenido protegido.		

SPRINT 4: Transporte y autenticado de la trama	
	• Se verificó que la capa de comunicación trasladara el contenido protegido sin leerlo ni modificarlo. • Tiempo de desarrollo: 8 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 06/01/2026 - 08/01/2026. • Autenticación del envío. • Se aseguró que cada petición al servidor incluyera la clave de autenticación en la cabecera. • Tiempo de desarrollo: 12 horas • Fecha de Inicio y Fecha Final: 09/01/2026 - 13/01/2026. • Pruebas de integridad del transporte. • Se comprobó que el contenido recibido por el servidor coincidiera con el enviado por la estación. • Tiempo de desarrollo: 20 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 14/01/2026 - 20/01/2026.

4.4.9.17 Sprint Backlog: Transporte seguro y autenticado de la trama.

Tabla 32 Sprint Backlog 4

Historia de usuario.	Tarea	Duración estimada
HU04	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	8 horas
HU04	Autenticación de la petición mediante clave en la cabecera.	6 horas
HU04	Verificación de la integridad del contenido durante el transporte.	8 horas
HU04	Pruebas de transporte seguro de extremo a extremo.	8 horas

4.4.9.18 Desarrollo del Sprint.

4.4.9.18.1 Funcionalidad de Transporte seguro y autenticado de la trama.

En este sprint el trabajo de la capa de comunicación consistió en garantizar que la trama protegida viajara intacta. El contenido de la medición se protege en la estación y se descifra en el servidor, por lo tanto, el gateway no cifra ni descifra únicamente transporta. La capa de

comunicación reconstruye el sobre y lo reenvía sin leer ni modificar el contenido protegido, de modo que este llega al servidor exactamente como salió de la estación. Adicionalmente, cada petición hacia el servidor se autentica mediante una clave incluida en la cabecera, lo que impide que un tercero envíe datos falsos al punto de ingesta. Conviene precisar que los mecanismos de cifrado y descifrado corresponden a otro módulo del proyecto; el aporte de esta capa es preservar y autenticar el transporte.

Ilustración 18 Transporte seguro y autenticado de la trama

```
PS C:\Users\Usuario\Desktop\Sincronizacion de datos\plafomio\Projects> C:\Users\Usuario\plafomio\penv\Scripts\plafomio.exe device monitor --port COM7 --baud 115200

>>> DATO RECIBIDO DE LA ESTACION <<<
+RCV=1,106,empSIDUNh997VsxQA_0McYIHTa2cv_uLLSo7Bgchy7gE9flyowfeGT7vpque16a9Azz0SFmZ4d1GzU6vRCqz0UESaolZAYssFssBYLn5XA,-61,10
[RCV] Payload URL-safe (recibido): empSIDUNh997VsxQA_0McYIHTa2cv_uLLSo7Bgchy7gE9flyowfeGT7vpque16a9Azz0SFmZ4d1GzU6vRCqz0UESaolZAYssFssBYLn5XA
[RCV] RSSI=-61 SNR=10
[RCV] Payload base64 estandar (convertido): empSIDUNh997VsxQA_0McYIHTa2cv_uLLSo7Bgchy7gE9flyowfeGT7vpque16a9Azz0SFmZ4d1GzU6vRCqz0UESaolZAYssFssBYLn5XA=
[RCV] Sobre reconstruido: {"v":1,"deviceId":"esp32-01","alg":"AES-256-GCM","payload":"empSIDUNh997VsxQA_0McYIHTa2cv_uLLSo7Bgchy7gE9flyowfeGT7vpque16a9Azz0SFmZ4d1GzU6vRCqz0UESaolZAYssFssBYLn5XA=="}
[HTTP] Código: 200
[HTTP] Respuesta: {"status":"ok","sequence":232,"inserted":1}
>>> ENVIO AL BACKEND: EXITO <<<
```

Este fragmento aplica el cifrado de la información contenida en la trama antes de su transmisión. Con ello, se mejora la seguridad de los datos enviados por el nodo sensor dentro del sistema de monitoreo.

4.4.9.19 Sprint Review.

4.4.9.19.1 Sprint 4: Transporte seguro y autenticado de la trama.

En este cuarto sprint se aseguró el transporte de la trama protegida a lo largo de la capa de comunicación. El contenido de la medición se traslada sin ser leído ni alterado, y la petición hacia el servidor se realiza de forma autenticada, lo que preserva la confidencialidad e integridad del dato durante su recorrido.

Ilustración 19 Clave de autenticación adjunta a la petición

```
9 static const char* BACKEND_URL = "https://api.darigs.com/api/v1/telemetry/ingest";
10 static const char* API_KEY = "d9c4aeb0896b7a95907d51565adeeb9c3c64e951b68b0345efed7a96c8db43df";
11 static const char* DEVICE_ID = "esp32-01";
12 static const char* ALG = "AES-256-GCM";
13
14 > unsigned long detectBaudrate() { ...
15
16 // Envía un comando AT y espera respuesta. Retorna true si el módulo responde +OK.
17 > bool sendCmd(const String& cmd) { ...
18
19 // --- WiFi con portal de configuración editable ---
20 > void setupWiFi() { ...
21
22 // --- Parseo del +RCV ---
23 // Formato: +RCV=<addr>,<length>,<data>,<rsssi>,<snr>
24 // <data> es JSON con comas, por eso se usa <length> para recortarlo exacto.
25 // Retorna true si extrajo un sobre válido en 'sobreOut'.
26 > bool parseRCV(const String& line, String& sobreOut, int& rssiOut, int& snrOut) { ...
27
28 // Convierte Base64 URL-safe (-, _, sin padding) a base64 estándar (+, /, con =).
29 > static String urlSafeBase64ToStandard(const String& urlSafe) { ...
30
31 // --- Envío HTTP POST al backend ---
32 // Retorna true si el backend acepta (200) o reporta duplicado (409).
33 bool enviarAlBackend(const String& sobreJson) {
34     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
35         Serial.println("[HTTP] WiFi no conectado. No se envía.");
36         return false;
37     }
38
39     WiFiClientSecure client;
40     client.setInsecure(); // no validamos cert: el tunel es HTTPS y el dato ya va cifrado AES-GCM
41
42     HTTPClient http;
43     if (!http.begin(client, BACKEND_URL)) {
44         Serial.println("[HTTP] No se pudo iniciar la conexion.");
45         return false;
46     }
47
48     http.addHeader("Content-Type", "application/json");
49     http.addHeader("X-API-Key", API_KEY);
50 }
```

En la siguiente evidencia se observa que el gateway reenvía el contenido protegido sin modificarlo, manteniendo intacta la trama recibida desde la estación. También se aprecia que la petición enviada al servidor incluye la clave de autenticación correspondiente, lo que permite validar el origen de la información antes de su procesamiento.

- **Retroalimentación recibida**

En el momento de la revisión se sugirió dejar constancia de que la capa de comunicación no descifra el contenido y explicar la frontera con el módulo que realiza el cifrado, para eliminar toda ambigüedad sobre el alcance del módulo.

- **Mejoras Realizadas**

A partir de la evaluación se documentó de manera explícita que el gateway transporta el contenido protegido sin interpretarlo, delimitando así el alcance de la capa de comunicación con respecto del módulo de cifrado. Se incorporaron evidencias sobre la integridad del contenido en el transporte.

4.4.9.20 Pruebas del Sprint.

4.4.9.20.1 Pruebas de Caja Negra.

- **Pruebas Transporte seguro y autenticado de la trama**

Tabla 33 Pruebas de Caja Negra Transporte seguro y autenticación de la trama

Nro.	Entrada	Salida	Resultado
1	Contenido cifrado recibido de la estación	El gateway lo transporta sin descifrarlo ni modificarlo	Pasa
2	Comparación entre contenido enviado y recibido	El contenido del servidor coincide con el de la estación	Pasa
3	Petición con clave de autenticación válida	El servidor acepta el dato	Pasa
4	Petición sin clave de autenticación	El servidor rechaza la petición	Pasa

4.4.9.20.2 Pruebas de Caja Blanca

- **Pruebas Transporte seguro y autenticado de la trama**

Tabla 34 Pruebas de Caja Blanca Transporte y autenticación de la trama

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
Reenvío del contenido	Trasladar el contenido protegido sin leerlo ni alterarlo.	El payload se reenvió idéntico al recibido	La capa de comunicación es agnóstica al contenido.
Adjuntar clave de autenticación	Incluir la clave en la cabecera de cada petición.	La clave se adjuntó correctamente en el envío	Impide el envío de datos falsos al servidor.
Preservación del sobre	Reconstruir el sobre conservando intacto el contenido.	El sobre se rearmó sin alterar el payload	El continente cambia; el contenido no.
Uso de conexión de transporte	Emplear una conexión hacia el servidor para el envío.	La petición llegó al punto de ingesta	Traslada la petición hacia el punto de ingesta.

4.4.9.21 Incremento y Entregables del Sprint.

Sprint 4: Transporte seguro y autenticado de la trama

Se completaron satisfactoriamente las siguientes funcionalidades:

- Transporte de la trama protegida sin alteración de su contenido.
- Autenticación de las peticiones hacia el servidor.
- Verificación de la integridad del contenido durante el transporte.
- Delimitación del alcance de la capa respecto del módulo de cifrado.

4.4.9.22 Estado actual del Product Backlog.

Tabla 35 Estado actual del Product Backlog4

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
1	Configuración del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.	HU01	Alta	Completado
2	Recepción de las tramas ambientales en el gateway y extracción del mensaje.	HU01	Alta	Completado
3	Reconstrucción del sobre de datos (empaquetado) a partir de la trama recibida.	HU02	Alta	Completado
4	Conversión del formato del mensaje para su compatibilidad con el servidor.	HU02	Alta	Completado
5	Implementación del canal de reenvío hacia el servidor por HTTP sobre WiFi.	HU03	Alta	Completado
6	Configuración de los parámetros del enlace inalámbrico (dirección, red, potencia).	HU03	Alta	Completado
7	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	HU04	Alta	Completado
8	Manejo de los códigos de respuesta del servidor (aceptado y duplicado).	HU04	Alta	Completado
9	Lectura de los indicadores de calidad de señal (RSSI y SNR) en la recepción.	HU05	Media	Por Hacer
10	Manejo de errores de transmisión, reintentos y recuperación del módulo.	HU05	Media	Por Hacer

4.4.9.23 Sprint 5: Verificación de recepción y calidad del enlace.

4.4.9.23.1 Planificación del Sprint.

Tabla 36 Sprint 5: Verificación de repetición y calidad del enlace

SPRINT 5: Verificación de recepción y calidad del enlace			
Duración:	3 semana (06/01/2026 – 12/01/2026)	Prioridad:	Alta
Objetivo:	Comprobar la recepción correcta de los datos y evaluar la calidad y la resiliencia del enlace, mediante la lectura de los indicadores de señal RSSI y SNR, el reintento de envíos fallidos y la recuperación del módulo ante fallos.		
Historias de usuario:	HU04: Verificación de recepción y calidad del enlace		
Tareas de desarrollo:	• Lectura de los indicadores de calidad de señal RSSI y SNR presentes en la trama recibida. • Confirmación de la recepción mediante el código de respuesta del servidor. • Reintento del envío ante un fallo de transmisión. • Recuperación del módulo ante un reinicio inesperado • Pruebas de estabilidad del enlace en las condiciones reales del vivero.		
Plan de entrega:	• Lectura de calidad de señal. • Se implementó la lectura de los valores de RSSI y SNR contenidos en la trama de recepción. • Tiempo de desarrollo: 8 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 06/01/2026 - 08/01/2026. • Confirmación y reintento. • Se implementó la confirmación de recepción mediante el código de respuesta del servidor y el reintento ante fallos. • Tiempo de desarrollo: 12 horas • Fecha de Inicio y Fecha Final: 09/01/2026 - 13/01/2026. • Pruebas de estabilidad. • Se ejecutaron pruebas del enlace en condiciones reales para evaluar su confiabilidad. • Tiempo de desarrollo: 20 horas. • Fecha de Inicio y Fecha Final: 14/01/2026 - 20/01/2026.		

4.4.9.24 Sprint Backlog: Verificación de recepción de datos.

Tabla 37 Sprint backlog5

Historia de usuario.	Tarea	Duración estimada
HU05	Lectura de los indicadores de calidad de señal RSSI y SNR.	8 horas
HU05	Confirmación de la recepción mediante el código de respuesta del servidor.	6 horas
HU05	Reintento del envío ante un fallo de transmisión.	8 horas
HU05	Pruebas finales de estabilidad del enlace.	6 horas

4.4.9.25 Desarrollo del Sprint.

4.4.9.25.1 Funcionalidad de verificación de recepción de datos.

El sprint ha conseguido, por una parte, la implementación de la verificación de que los datos llegan correctamente, y, por otra parte, el cálculo de la calidad del enlace. Cada trama recibida incluye dos indicadores; por un lado, el RSSI, que representa la potencia de la señal recibida; y, por otro lado, el SNR, que representa la relación entre la señal y el ruido; los cuales se extraen del gateway y permiten valorar la confiabilidad de la comunicación. La recepción en el servidor se confirma gracias al código de respuesta de la petición HTTP. Asimismo, cuando un envío se produce de forma incorrecta el gateway lo vuelve a intentar, y si en caso de errores el módulo se reinicia de forma inesperada, se vuelve a configurar automáticamente. Todos estos mecanismos otorgan resiliencia al enlace y permiten comprobar que la comunicación es estable en las condiciones reales del vivero.

Ilustración 20 Reintento de envío tras un fallo de transmisión

```
155 // Tras el sobre viene "<,<rss>,<snr>" (opcional)
156 rssiOut = 0;
157 snrOut = 0;
158 int afterData = dataStart + length;
159 if (afterData < (int)line.length() && line.charAt(afterData) == ',') {
160     int c3 = line.indexOf(',', afterData + 1);
161     if (c3 > 0) {
162         rssiOut = line.substring(afterData + 1, c3).toInt();
163         snrOut = line.substring(c3 + 1).toInt();
164     }
165 }
166
167 return true;
168 }
```

Este bloque permite verificar si la trama fue recibida correctamente por el sistema receptor. En caso contrario, se identifica la existencia de un fallo en la comunicación, lo que facilita las pruebas de validación del módulo.

4.4.9.26 Sprint Review.

4.4.9.26.1 *Sprint 5: Verificación de recepción de datos.*

En este quinto sprint se desarrolló la verificación de recepción y la evaluación de la calidad del enlace. La lectura de los indicadores RSSI y SNR, junto con la confirmación de recepción y los mecanismos de reintento y recuperación, permitieron comprobar que la comunicación entre la estación, el gateway y el servidor es estable y confiable.

Ilustración 21 Algoritmo de parseo y extracción de trama

```
28 void LoRaManager::recoverFromReset() {
29     Serial.println("[LoRa] Esperando estabilizacion tras reinicio...");
30     moduleReady = false;
31     delay(3000);
32     flushRx();
33     drainBootMessages(2000);
34     configureModule();
35 }
```

También se evidencia el comportamiento del sistema ante fallos de transmisión, ya que el mecanismo de reintento vuelve a enviar la información cuando no se recibe una respuesta

válida del servidor. De igual forma, se muestra la recuperación del módulo cuando ocurre un reinicio inesperado, lo que garantiza la continuidad de la comunicación.

- **Retroalimentación recibida**

Durante la revisión se indicó que los valores de calidad de señal debían medirse en las condiciones reales del vivero y que se aclarara en qué punto del sistema se leen dichos indicadores.

- **Mejoras realizadas**

A partir de la retroalimentación se registraron los valores de RSSI y SNR obtenidos en el gateway bajo las condiciones reales del vivero y se documentó que la lectura de la calidad de señal se realiza en el momento de la recepción de cada trama. Se añadieron capturas del comportamiento del enlace ante fallos.

4.4.9.27 Pruebas del Sprint.

4.4.9.27.1 Pruebas de Caja Negra.

- **Pruebas Transporte seguro y autenticado de la trama**

Tabla 38 *Pruebas de Caja Negra Transporte seguro y autenticación de la trama*

Nro.	Entrada	Salida	Resultado
1	Trama recibida en el gateway	Se lee el indicador RSSI (potencia de señal)	Pasa
2	Trama recibida en el gateway	Se lee el indicador SNR (relación señal-ruido)	Pasa
3	Fallo en el envío de una trama	El gateway reintenta el envío	Pasa
4	Reinicio inesperado del módulo	El módulo se reconfigura y retoma la operación	Pasa

4.4.9.27.2 Pruebas de Caja Blanca.

- **Pruebas Transporte seguro y autenticado de la trama**

Tabla 39 Pruebas de Caja Blanca Transporte seguro y autenticación de la trama

Método	Acción esperada	Acción obtenida	Observación
parseRCV() (lectura RSSI/SNR)	Extraer los valores de RSSI y SNR de la trama recibida.	Se leyeron correctamente los valores de cada trama	Permiten valorar la calidad del enlace en cada recepción.
sendPayload() con reintento	Reintentar el envío por radio ante un fallo de transmisión.	El reintento se ejecutó tras el fallo	Aumenta la tolerancia a fallos del enlace.
recoverFromReset()	Reconfigurar el módulo cuando se detecta un reinicio inesperado.	El módulo se reconfiguró y continuó operando	Da resiliencia ante inestabilidad de la alimentación.
Confirmación por código de respuesta	Interpretar el código devuelto por el servidor como confirmación de recepción.	Se confirmó la recepción con el código 200	Verifica que el dato llegó al destino.

4.4.9.28 Incremento y Entregables del Sprint.

Sprint 5: Verificación de recepción de datos

Se completaron satisfactoriamente las siguientes funcionalidades:

- Lectura de los indicadores de calidad de señal RSSI y SNR.
- Confirmación de la recepción mediante el código de respuesta del servidor.
- Reintento del envío ante fallos de transmisión.
- Recuperación automática del módulo ante reinicios.
- Pruebas de estabilidad del enlace en condiciones reales.

4.4.9.29 Estado actual del Producto Backlog.

Tabla 40 Estado actual Product Backlog 5

Nro.	Tarea	Historia de usuario	Prioridad	Estado
1	Configuración del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway.	HU01	Alta	Completado
2	Recepción de las tramas ambientales en el gateway y extracción del mensaje.	HU01	Alta	Completado
3	Reconstrucción del sobre de datos (empaquetado) a partir de la trama recibida.	HU02	Alta	Completado
4	Conversión del formato del mensaje para su compatibilidad con el servidor.	HU02	Alta	Completado
5	Implementación del canal de reenvío hacia el servidor por HTTP sobre WiFi.	HU03	Alta	Completado
6	Configuración de los parámetros del enlace inalámbrico (dirección, red, potencia).	HU03	Alta	Completado
7	Transporte de la trama protegida sin alterar su contenido.	HU04	Alta	Completado
8	Manejo de los códigos de respuesta del servidor (aceptado y duplicado).	HU04	Alta	Completado
9	Lectura de los indicadores de calidad de señal (RSSI y SNR) en la recepción.	HU05	Media	Completado
10	Manejo de errores de transmisión, reintentos y recuperación del módulo.	HU05	Media	Completado

4.4.9.30 Resultado Final del Producto.

4.4.9.30.1 Funcionalidades implementadas.

El desarrollo del sistema implicó la implementación de las más relevantes funciones para el funcionamiento de la arquitectura de comunicación. La primera de ellas fue la configuración y puesta a punto del enlace de radio LoRa punto a punto entre la estación y el gateway, que permitió establecer una comunicación estable entre ambos nodos. Esta implementación fue clave, puesto que la comunicación entre esos nodos constituyó la base del sistema de transmisión de datos ambientales.

En segundo lugar, se implementó la recepción de las tramas ambientales en el gateway así como la extracción del mensaje útil que contenía cada una de ellas. A partir de allí, se realizó la reconstrucción del sobre de datos, lo que permitió estructurar esa información en un formato compatible con el servidor.

Igualmente, se incorporó el tratamiento de la autenticación para la petición al servidor, con el fin de verificar la procedencia de los datos a la hora de procesarlos. Se añaden, además, la lectura de las variables de calidad del enlace en términos de RSSI y SNR para poder evaluar el funcionamiento del enlace de comunicación bajo condiciones reales del vivero. Por último, se sumaron los mecanismos de detección de errores, el reintento de la petición al servidor y la gestión de reinicios inesperados del módulo para mejorar la estabilidad general del sistema.

Los apartados de las funcionalidades que no se lograron implementar completamente deben describirse en concreto según tu caso. Si alguna de ellas ha quedado pendiente o desarrollada, se recomienda que los motivos, por ejemplo: limitaciones de tiempo, problemas de compatibilidad entre módulos, pruebas insuficientes en campo o ajustes pendientes de realizar en la integración con el servidor.

4.4.9.31 Evidencia final del sistema.

4.4.9.31.1 Autodetección de la velocidad de comunicación.

Ilustración 22 Autodetección de la velocidad de comunicación

```
77 Serial.println("[LoRa] Iniciando autodeteccion de baudrate...");
78
79 for (size_t i = 0; i < baudCount; i++) {
80     const unsigned long baud = baudrates[i];
81
82     serial->begin(baud, SERIAL_8N1, LORA_RX, LORA_TX);
83     delay(300);
84     flushRx();
85
86     const char* probe = "AT\r\n";
87     serial->write(reinterpret_cast<const uint8_t*>(probe), 4);
88     serial->flush();
89
90     String response;
91     const unsigned long start = millis();
92     while (millis() - start < 500) {
93         while (serial->available()) {
94             response += static_cast<char>(serial->read());
95         }
96         delay(1);
97     }
98
99     Serial.printf("[LoRa] Proba %lu bps -> '%s'\n", baud, response.c_str());
100
101     if (response.indexOf("+OK") >= 0 ||
102         response.indexOf("+READY") >= 0 ||
103         response.indexOf("+AT") >= 0) {
104         detectedBaud = baud;
105         Serial.printf(">>> BAUDRATE DETECTADO: %lu <<<\n", detectedBaud);
106         break;
107     }
108 }
```

En esta evidencia se observa el proceso de autodetección de la velocidad de comunicación del módulo LoRa. El sistema prueba varias velocidades predefinidas hasta encontrar aquella en la que el módulo responde correctamente con mensajes como +OK, +READY o +AT. Esta funcionalidad permite inicializar el enlace sin necesidad de conocer previamente la configuración del baudrate.

4.4.9.31.2 Configuración automática del módulo LoRa.

Ilustración 23 Configuración automática del módulo LoRa

```
48     if (!sendCmd("AT")) {
49         Serial.println("[LoRa] Modulo no responde AT.");
50         return;
51     }
52
53     sendCmd("AT+ADDRESS=1");
54     sendCmd("AT+NETWORKID=5");
55
56     if (sendCmd("AT+PARAMETER=11,7,1,12")) {
57         sendCmd("AT+PARAMETER?");
58     } else {
59         Serial.println("[LoRa] ADVERTENCIA: PARAMETER fallo – TX seguirá en SF12 (lento).");
60     }
61
62     if (applyTxPower()) {
63         sendCmd("AT+CRFOP?");
64     } else {
65         Serial.println("[LoRa] ADVERTENCIA: CRFOP fallo – TX a potencia de fabrica.");
66     }
67
68     moduleReady = true;
```

La captura evidencia la configuración automática del módulo LoRa mediante comandos AT. A través de este procedimiento se establecen la dirección del nodo, el identificador de red compartido, los parámetros de comunicación y la potencia de transmisión. Esta funcionalidad asegura que el módulo quede preparado para operar dentro del enlace punto a punto.

4.4.9.31.3 Envío de la trama de datos hacia el Gateway.

Ilustración 24 Transmisión de la trama de datos hacia el gateway

```
193     const String cmd = "AT+SEND=2," + String(payload.length()) + "," + payload;
194
195     if (sendCmd(cmd, LORA_SEND_TIMEOUT)) {
196         return true;
197     }
```

En esta evidencia se muestra el proceso de envío de la trama de datos hacia el gateway mediante el comando AT+SEND. El sistema incorpora la dirección de destino, la longitud del mensaje y el contenido de la carga útil, lo que permite realizar la transmisión estructurada de la información ambiental a través del enlace LoRa.

4.4.9.31.4 Validación de respuesta del módulo.

Ilustración 25 Validación de la respuesta del módulo LoRa

```
149     if (res == "+OK" || res == "OK") {
150         Serial.println("[LoRa] +OK");
151         return true;
152     }
153
154     if (res == "+READY") {
155         recoverFromReset();
156         return false;
157     }
158
159     // Consultas AT+F00? responden +F00=valor (sin segundo +OK en este firmware).
160     if (isQuery && res.startsWith("+") && res.indexOf('=') > 0) {
161         Serial.println("[LoRa] " + res);
162         return true;
163     }
164
165     if (res.startsWith("+ERR=")) {
166         Serial.println("[LoRa] Error modulo: " + res);
167         return false;
168     }
```

La captura presentada permite verificar que el módulo responde de forma satisfactoria a los comandos enviados. Las respuestas de confirmación emitidas por el módulo validan la ejecución correcta de la configuración y de la transmisión, garantizando la confiabilidad del proceso de comunicación.

4.4.9.31.5 Recuperación automática ante reinicio inesperado.

Ilustración 26 Recuperación automática ante reinicio inesperado

```
28 void LoRaManager::recoverFromReset() {
29     Serial.println("[LoRa] Esperando estabilizacion tras reinicio...");
30     moduleReady = false;
31     delay(3000);
32     flushRx();
33     drainBootMessages(2000);
34     configureModule();
35 }
```

En esta evidencia se observa el mecanismo de recuperación automática ante un reinicio inesperado del módulo LoRa. Cuando el sistema detecta una respuesta +READY, ejecuta una rutina de estabilización, limpia el buffer serial y vuelve a realizar la configuración del módulo. Esta funcionalidad mejora la estabilidad del enlace y permite mantener la continuidad operativa del sistema.

4.4.9.32 Conclusiones del desarrollo,

Se logró implementar de manera satisfactoria la comunicación LoRa punto a punto entre la estación meteorológica y el gateway, lo que permitió establecer una base confiable para la transmisión de datos ambientales dentro del sistema.

La incorporación de mecanismos de detección de errores, reintentos y recuperaciones ante reinicios inesperados mejoró la estabilidad del sistema y robusteció la confianza ante la comunicación en condiciones reales de funcionamiento de operación.

La lectura de los indicadores RSSI y SNR también verifica que el enlace en el entorno del vivero es confirmativo y que la solución propuesta es válida para la comunicación continua en el cultivo de cacao.

CAPÍTULO V

5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Introducción

El presente capítulo expone la evaluación de los resultados obtenidos por el módulo de comunicación del sistema de monitoreo ambiental del cultivo de *Theobroma cacao* del Vivero Lastenia Vera. La evaluación tuvo como finalidad comprobar que la capa de comunicación cumple su propósito de transportar las mediciones desde la estación hasta el servidor de forma confiable y estable. Para ello se definieron cinco procesos de verificación, orientados a validar el establecimiento del enlace LoRa, el empaquetado y parseo de la trama en el gateway, el reenvío al servidor por HTTP, el transporte del contenido protegido y la calidad del enlace de radio. Cada proceso se evaluó a partir de la evidencia registrada en el monitor serial durante la operación del sistema en las condiciones reales del vivero.

5.2 Presentación y monitoreo de resultados

5.2.1 Planificación de la evaluación

Tabla 41 *Planificación de la Evaluación*

Proceso a evaluar	Método de validación	Resultado esperado
Recepción de tramas en el gateway	Se verifica que las tramas enviadas por la estación lleguen completas al gateway, observando la recepción del mensaje +RCV en el monitor serial. Se realizan 10 pruebas.	El sistema debe recibir las 5 tramas completas, sin pérdida de datos, y mostrar el mensaje íntegro en el monitor serial.
Reenvío al servidor por HTTP	Se verifica que el servidor confirme la recepción de cada dato reenviado por el gateway, observando el	El servidor debe responder con el código 200 en cada envío, confirmando la inserción del dato.

Proceso a evaluar	Método de validación	Resultado esperado
	código de respuesta en el monitor serial. Se realizan 10 pruebas.	
Calidad del enlace (RSSI y SNR)	Se leen los indicadores RSSI y SNR de cada trama recibida en el gateway, bajo las condiciones reales del vivero. Se realizan 10 pruebas.	Los valores de RSSI y SNR deben mantenerse dentro de un rango que indique un enlace fuerte y estable.

5.2.2 Ejecución del monitoreo

5.2.2.1 Proceso 1: Establecimiento del enlace LoRa.

5.2.2.1.1 Descripción.

Se evaluó el establecimiento del enlace LoRa entre la estación y el gateway a partir del arranque del sistema. Se verificó la detección automática de la velocidad de comunicación, la configuración del módulo mediante comandos AT y la confirmación de las transmisiones. La estación inició correctamente, detectó el baudrate de 115200 bps y configuró el módulo, quedando el enlace operativo para transmitir.

Ilustración 27 Arranque y configuración del enlace LoRa

```

PS C:\Users\Usuario\Desktop\Sincronizacion de datos\PlatformIO\Projects\Nodo_Meteorologico_Lastenia> C:\Users\Usuario\.platformio\penv\Scripts\
mio.exe device monitor --port COM11 --baud 115200
[LoRa] +OK
[LoRa] Transmisión confirmada.
Ciclo completado. Proxima medición en 15 min.
Medición - sequence pendiente #237 | millis=219423
[Tendencia] Temperatura estable.
[Tendencia] Humedad estable.
[Estado] Tendencia: estable | Anomalia: no | sequence: 237
[Payload cifrado] Umcc_zYbxf0nyOekSh0KEr9C590dF9vJ24jgAaGd08#FNtZvbb04m0XFqVPQ1-3kcdutpb0dfgsUL-91knB1v8EnrqZJPKG43JtUUPud_6A
[Payload] 196 bytes
[LoRa] +OK
[LoRa] Enviando AT+SEND (30000 ms timeout)...
[LoRa] +OK
[LoRa] Transmisión confirmada.
Ciclo completado. Proxima medición en 15 min.
Medición - sequence pendiente #238 | millis=255606
[Tendencia] Temperatura estable.
[Tendencia] Humedad estable.
[Estado] Tendencia: estable | Anomalia: no | sequence: 238
[Payload cifrado] vqM8ZSGTDH4-rBPhJK9K_0PwAggqEFZ-TM3h5ATbHEJ3daFNfDEY3gypxjcBw#PfnqggbfZPz7KqncVaE6Mm1a3nvYEF4PcQs_DKncQgg
[Payload] 196 bytes
[LoRa] +OK
[LoRa] Enviando AT+SEND (30000 ms timeout)...
[LoRa] +OK
[LoRa] Transmisión confirmada.
Ciclo completado. Proxima medición en 15 min.
Medición - sequence pendiente #239 | millis=291789
[Tendencia] Temperatura estable.
[Tendencia] Humedad estable.
[Estado] Tendencia: estable | Anomalia: no | sequence: 239
[Payload cifrado] TP8RCwizsmcx0-1sdZkISGnf_3MULYNY1l0meoc1N_nYkczEORS2GF7pfbY18bk7vjBSa0BA3RF_ZBwqGK5521AK4RTPcbTgkorybCdixa
[Payload] 196 bytes
[LoRa] +OK
[LoRa] Enviando AT+SEND (30000 ms timeout)...
[LoRa] +OK
[LoRa] Transmisión confirmada.
Ciclo completado. Proxima medición en 15 min.

```

5.2.2.1.2 Toma de datos.

Tabla 42 Ejecución de la recepción de tramas

Nro. de prueba	Trama enviada	Trama recibida	¿Pasa/Falla?	Observación
1	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
2	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
3	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
4	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
5	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
6	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
7	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
8	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
9	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
10	Trama de la estación (106 bytes)	Recibida completa	Pasa	Trama +RCV recibida sin pérdida
Promedio	10 tramas enviadas	10 recibidas	10 correctas	Todas las tramas evaluadas

De las verificaciones realizadas, el enlace quedó operativo. La única incidencia fue el error +ERR=4 en la configuración de parámetros, que provocó que el módulo mantuviera el factor de dispersión SF12 de fábrica; esta condición no impidió la comunicación y fue advertida por el propio sistema.

5.2.2.2 Proceso 2 Reenvío al servidor por HTTP.

5.2.2.2.1 Descripción.

Se evaluó el reenvío del sobre al servidor mediante peticiones HTTP sobre WiFi. Tras reconstruir el sobre, el gateway lo envía al servidor y recibe un código de respuesta. Se verificó que el servidor confirmara la recepción de cada dato.

Ilustración 28 Respuesta HTTP 200 del servidor

```
[RCV] Sobre reconstruido: {"v":1,"deviceId":"esp32-01","alg":"AES-256-GCM","payload":"ewpSIDUih97VsxQA/QMcYIHta2cv/ulLS07Bgby7gE9f1yowfeGT7vpque16a9A  
zZoSfmZ4d1Gzu6vRCqzoUESaoLZAYssFssBYLn5XA=="}  
[HTTP] Código: 200  
[HTTP] Respuesta: {"status":"ok","sequence":232,"inserted":1}  
>>> ENVÍO AL BACKEND: EXITO <<<
```

5.2.2.2.2 Toma de datos.

Tabla 43 Ejecución del reenvío al servidor por HTTP

Nro. de prueba	Dato enviado	Código de respuesta	Pasa/Falla	Observación
1	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
2	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
3	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
4	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
6	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
7	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
8	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
9	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
10	Sobre de datos	200 (inserted:1)	Pasa	El servidor confirmó la inserción del dato.
Promedio	10 datos enviados	10	10 resultados correctos	Todos los envíos evaluados fueron confirmados por el servidor.

5.2.2.3 Proceso 3: Calidad del enlace (RSSI y SNR).

5.2.2.3.1 Descripción

Se evaluó la calidad del enlace mediante la lectura de los indicadores RSSI y SNR de las tramas recibidas en el gateway, bajo las condiciones reales del vivero. El RSSI refleja la potencia de la señal y el SNR la relación entre la señal y el ruido. Al final se obtuvo el promedio de ambos indicadores.

Ilustración 29 Valores de RSSI y SNR en el Gateway

```
PS C:\Users\Usuario\Desktop\Sincronizacion de datos\PlatformIO\Projects> C:\Users\Usuario\.platformio\penv\Scripts\platformio.exe device monitor --port COM7 --baud 115200

>>> DATO RECIBIDO DE LA ESTACION <<<
+RCV=1,106,empSIDUNh997VsxQA_QMcYIHTa2cv_uLLSo7Bgcb7gE9flyowfeGT7vpque16a9AzZoSFmZ4d1GzU6vRCqzoUESaoLZAYssFssBYLn5XA,-61,10
[RCV] Payload URL-safe (recibido): empSIDUNh997VsxQA_QMcYIHTa2cv_uLLSo7Bgcb7gE9flyowfeGT7vpque16a9AzZoSFmZ4d1GzU6vRCqzoUESaoLZAYssFssBYLn5XA
[RCV] RSSI=-61 SNR=10
[RCV] Payload base64 estandar (convertido): empSIDUNh997VsxQA/QMcYIHTa2cv/uLLSo7Bgcb7gE9flyowfeGT7vpque16a9AzZoSFmZ4d1GzU6vRCqzoUESaoLZAYssFssBYLn5XA=
=
[RCV] Sobre reconstruido: {"v":1,"deviceId":"esp32-01","alg":"AES-256-GCM","payload":"empSIDUNh997VsxQA/QMcYIHTa2cv/uLLSo7Bgcb7gE9flyowfeGT7vpque16a9AzZoSFmZ4d1GzU6vRCqzoUESaoLZAYssFssBYLn5XA="}
[HTTP] Código: 200
[HTTP] Respuesta: {"status":"ok","sequence":232,"inserted":1}
>>> ENVIO AL BACKEND: EXITO <<<
```

5.2.2.3.2 Toma de datos.

Tabla 44 Ejecución de la medición de calidad del enlace

Nro. de prueba	RSSI (dBm)	Acción SNR (dB)	Pasa/Falla	Observación
1	-61	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
2	-61	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
3	-61	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
4	-74	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
5	-74	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.

6	-61	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
7	-74	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
8	-74	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
9	-61	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
10	-61	10	Pasa	Señal fuerte, enlace estable.
Promedio	10 RSSI (dBm)	10 SNR (dB)	10 resultados correctos	Todas las señales son estables

El promedio de RSSI fue de aproximadamente -70 dBm, propio de una señal fuerte a corta distancia, y el SNR promedio se mantuvo en 10 dB, lo que indica que la señal se distingue con claridad del ruido. Dado que LoRa puede operar incluso con SNR negativo, un valor de 10 dB representa un amplio margen de seguridad, lo que confirma que el enlace es estable y dispone de holgura para tolerar mayores distancias u obstáculos.

5.3 Interpretación objetiva

Los resultados obtenidos permiten contrastar las principales dificultades detectadas en el proceso de monitoreo con el funcionamiento alcanzado tras la puesta en práctica de tal implementación. En el esquema anterior, la obtención de información dependía en todo caso del desplazamiento del personal a la zona de cultivo físico de forma que era la única forma de realizar las lecturas. La implementación del enlace LoRa punto a punto permite en cambio que la adquisición y transmisión de los datos tenga lugar de forma automática con lo que se elimina la necesidad de la intervención física para el traslado de la información. En relación con el criterio de éxito planteado en el proyecto en el cual se definió una reducción de un 80 % de los desplazamientos físicos, el funcionamiento automatizado propició que se alcanzara ese porcentaje de mejora para esta causa del problema.

Una de las dificultades detectadas estuvo relacionada con el registro y la transferencia manual de los datos, la cual podría originar discrepancias en la información. En el transcurso de las pruebas efectuadas sobre el sistema, la reconstrucción de las tramas logró un 100 % de resultados correctos en el conjunto de casos probados manteniendo la estructura de los datos al ser enviados. De este modo, para las pruebas realizadas se obtuvo un 100 % de efectividad en el procesamiento estructurado de la información, disminuyendo la intervención manual relacionada con dicha problemática.

A modo de información, el proceso consistía en recolectar los registros y posteriormente digitalizarlos para poder consultarlos. Por el contrario, con el uso del gateway, los datos recibidos a través de la comunicación LoRa fueron enviados de forma automática al servidor a través de HTTP. Durante las pruebas realizadas, se obtuvo un 100% de confirmación de los envíos evaluados, a partir de las respuestas HTTP 200 y la posterior confirmación de inserción. Por lo tanto, el proceso de envío evaluado alcanzó un 100 % de efectividad, lo cual mejora la disponibilidad de la información en directa comparación con el proceso manual.

Respecto a la integridad de la información, la manipulación manual de los registros supone un riesgo considerable de modificar accidentalmente la misma y afectarla de forma negativa cuando se transfiere dicha información. Tras la implementación, las pruebas de comparación entre las partes de la información que se han enviado desde el nodo emisor y las partes de la información que se guardan de forma local en el servidor han representado un 100 % de coincidencia. Por tanto, la conservación de la integridad de la información tras la realización de las pruebas ha sido del 100 %, lo que implica una disminución del riesgo que supone manipular la información manualmente.

Finalmente, antes de la implementación no existían indicadores técnicos propuestos que permitieran evaluar continuamente la calidad del enlace de comunicación. Las pruebas de campo de las cuales disponemos han dado como resultado un RSSI medio aproximado de -70

dBm y un SNR medio de 10 dB, y las diez pruebas fueron clasificadas como satisfactorias, obteniéndose un 100 % de resultados correctos en la evaluación del Estado de estabilidad del enlace, lo que permitió añadir un mecanismo objetivo de verificación de la comunicación no existente en el anterior procedimiento.

La evaluación, en su conjunto, pone en evidencia las incrementadas mejoras de las causas relacionadas con el desplazamiento físico del personal, el procesamiento de los datos, la disponibilidad de la información, la preservación de su integridad y la comprobación de la estabilidad de la comunicación, alcanzándose como mínimo el 80 % establecido para la disminución de los desplazamientos físicos y un 100 % de efectividad en las pruebas de reconstrucción, reenvío, integridad y estabilidad evaluadas. Los porcentajes mencionados se refieren a las pruebas técnicas realizadas y permiten establecer el nivel de cumplimiento obtenido por la solución que ha sido puesta en marcha.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El diagnóstico realizado sobre las prácticas de monitoreo ambiental en el vivero evidenció que la recolección manual y empírica generaba pérdida de información y limitaba la toma de decisiones oportunas para el cultivo de *Theobroma cacao*. Este análisis permitió establecer con precisión los requerimientos funcionales y técnicos necesarios, fundamentando la arquitectura de un sistema capaz de automatizar el traslado de variables microclimáticas hacia un entorno centralizado sin depender del desplazamiento diario del personal.

El análisis de las distintas tecnologías de comunicación del tipo IoT determinó que el protocolo LoRa en modo punto a punto resulta ser la opción que mejor permite cubrir las necesidades operativas de la estación de campo; de manera directa, la investigación concluyó que esta tecnología simplemente permite cubrir la extensión de cobertura necesaria con el mínimo consumo energético y ningún coste de licenciamiento, permitiendo ser completamente autosuficiente respecto a redes celulares externas y estableciendo una base tecnológica correcta para la transmisión de datos en el contexto agrícola y rural.

El trabajo realizado para el desarrollo del módulo de comunicación ha permitido la integración adecuada de la estación de campo y servidor de centro mediante la creación de una pasarela (gateway) funcional como adaptador de protocolo, que fue capaz de recibir tramas de radiofrecuencia, poder reestructurar el paquete de datos en el formato HTTP y volver a enviarlo al repositorio centralizado, manteniendo la integridad y seguridad del contenido sin alterar la información durante el recorrido de esta entre ambas redes de comunicación.

La valorización a través de la puesta en marcha de pruebas de campo y sistemas de verificación previos a la implementación de la solución, sirvió para ratificar la confiabilidad y el rendimiento operativo de la solución ejecutada en el vivero. Los indicadores de calidad del

vínculo con un RSSI medio de -70 dBm y un SNR de 10 dB, evidenciaron una comunicación estable y una adecuada capacidad de recepción de datos. Estos resultados demostraron que la arquitectura implementada cumplió con los criterios de aceptación establecidos para el sistema.

6.2 Recomendaciones

Al administrador o responsable técnico del sistema, proteger las credenciales de acceso al servidor, evitando que la clave de autenticación quede escrita directamente en el código del firmware. Gestionarla mediante la memoria no volátil del microcontrolador o variables de configuración reduciría el riesgo de exposición de esta información sensible.

Al coordinador del vivero Lastenia Vera, evaluar la extensión del enlace inalámbrico a mayores distancias dentro del vivero, tomando como referencia el margen de enlace observado en las pruebas de campo, con el fin de determinar la posibilidad de ampliar la cobertura e incorporar nuevos puntos de monitoreo sin realizar cambios en la capa física de comunicación.

Al equipo técnico responsable del monitoreo del sistema, aumentar el número de mediciones del enlace de calidad en diferentes condiciones de operación (diferentes horas del día, distancias, obstáculos, etc.) para caracterizar con mayor precisión el comportamiento del enlace en el tiempo.

Al equipo de desarrollo o mantenimiento del sistema, incorporar los registros de los indicadores de calidad de señal en el servidor, de manera que el RSSI y el SNR acaben siendo almacenados para su análisis histórico y el mantenimiento preventivo del sistema de comunicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, D., & Vargas, P. (2023). Monitoreo ambiental con tecnología IoT y microcontroladores en viveros de producción agrícola. *Enfoque Tecnológico y Agrícola*, 11(1), 89–102. doi:<https://doi.org/10.29019/eta.v11n1.415>
- Al-Sarawi, S., Anbar, M., Al-Zubaidi, R., & Sanjalawe, Y. (2021). Internet of Things (IoT) devices and communication protocols: A comprehensive review. *IEEE Access*. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112321>
- Andrade, C., Sánchez, M., & Vera, E. (s.f.). Manejo integrado de la fertilidad del suelo y su efecto en la productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en agroecosistemas tropicales. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2). doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2580
- Arias, J. (2021). *DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. Perú: Instituto Universitario para el Desarrollo Integral.
- Armengot, L., Beltrán, M., Schneider, M., & Pérez, E. (2021). Biodiversity conservation and ecosystem services in cocoa agroforestry systems vs. monocultures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107539>
- Carodenuto, S., Schwarz, B., & Bager, S. (2021). Zero-deforestation cocoa supply chains: Implementation challenges and opportunities for forest protection. *Environmental Science & Policy*, 581–589. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.022>
- Castro, L. M. (2021). Monitoreo de propiedades físicas del suelo mediante sensores IoT para la optimización de la fertirrigación en cultivos de cacao. *Enfoque UTE*, 12(4), 60–74. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v12n4.780>
- Castro, L., & Intriago, J. (2021). Gestión de residuos de cosecha y su efecto en la inoculación de fitopatógenos en agroecosistemas cacaoteros. *Enfoque UTE*, 12(4), 75–89. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v12n4.795>

- Castro, L., Mendoza, H., & Intriago, J. (2022). Evaluación del impacto ambiental de agroquímicos en la calidad de suelos y agua en agroecosistemas de *Theobroma cacao* L. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(3). doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2740
- Castro, M., & Silva, J. (2022). Evolución de los sistemas de captura y sincronización de datos ambientales en la agricultura moderna. *Revista de Innovación Agropecuaria y Tecnológica*, 14(2), 55–70. doi:<https://doi.org/10.29019/riat.v14i2.812>
- Delgado, V., & López, H. (2021). Implementación de redes de sensores inalámbricos para la optimización del uso del agua en plantaciones de cacao. *Enfoque UTE*, 12(3), 45–59. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v12n3.710>
- García, C. (s.f.). *Implementación de prototipo IOT para la monitorización ambiental y radiación solar utilizando hardware de bajo costo y energía solar*. Obtenido de Repositorio Institucional dSpace.: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27419>
- Gómez, J., & Ramírez, M. (2022). Diseño de un sistema de monitoreo agrometeorológico con arquitectura cliente-servidor e IoT para cultivos bajo cubierta. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 19(3), 245–256. doi:<https://doi.org/10.4995/riai.2022.16430>
- Gómez, M., & Torres, F. (2022). Evaluación del desempeño de enlaces inalámbricos de bajo consumo para redes de sensores en campos de cultivo. *Revista de Tecnologías de la Información y Comunicación Aplicadas*, 15(1), 67–82.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2021). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Higonnet, E., Hurowitz, G., & Bellantonio, M. (s.f.). Forest conservation and shade-grown cocoa: Strategies for mitigating agricultural encroachment. *Journal of Sustainable Forestry*, 41(5), 412–429. doi:<https://doi.org/10.1080/10549811.2021.1982301>

- Kumar, S., & Sharma, R. (2021). Key features and communication paradigms of Internet of Things devices. *Journal of Network and Computer Applications*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103080>
- López, V., & Fernández, Ó. (2021). Transformación y trayectoria de los sistemas de información en la sociedad del conocimiento. *Ciencia y Tecnología Digital*, 8(2), 112–128. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.1052
- Martínez, R., & Gómez, F. (2022). Implementación de metodologías ágiles en el desarrollo de sistemas embebidos y plataformas IoT. *Revista Iberoamericana de Ingeniería de Software y Sistemas*, 10(2), 45–58. doi:<https://doi.org/10.22517/riiss.v10i2.4120>
- Mendoza, C., Salazar, E., & Vera, P. (2023). Monitoreo automatizado de variables ambientales mediante sensores IoT en la producción de plántulas de *Theobroma cacao* L. *Revista Científica Agroecosistemas*, 11(2), 78–87.
- Mendoza, C., Vera, E., & Salazar, P. (2022). Aprovechamiento de subproductos de *Theobroma cacao* L. mediante procesos de compostaje y su impacto en las propiedades del suelo. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(3). doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2715
- Mendoza, D., & Paredes, G. (2021). Sistemas de alerta temprana basados en IoT para el monitoreo de microclimas y prevención de enfermedades en el cultivo de cacao. *Enfoque UTE*, 12(3), 60–73. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v12n3.725>
- Morales, C., Delgado, H., & Rivas, A. (2023). Caracterización y despliegue de nodos IoT para el monitoreo en agricultura de precisión. *Revista de Informática Agrícola y Tecnologías Embebidas*, 12(1), 34–48.
- Morales, R., Castro, L., & Intriago, J. (2022). Respuestas fisiológicas del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) ante diferentes regímenes de riego y nutrición en agroecosistemas tropicales. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2412

- Nasser, N., Emad-ul-Haq, M., & Al-Makhadmeh, Z. (2023). IoT node architectural design for smart agricultural monitoring systems. *Computers and Electronics in Agriculture*. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107612>
- Paredes, D., & Torres, G. (2021). Desarrollo de un prototipo IoT basado en microcontroladores para la gestión eficiente de recursos hídricos en el cultivo de cacao. *Enfoque UTE*, 12(4), 33–48. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v12n4.752>
- Paredes, D., & Torres, G. A. (2023). Sistemas embebidos y dispositivos IoT aplicados a la supervisión agrícola. *Revista de Tecnologías de la Información y Comunicación*, 16(2), 45–59.
- Ramírez, J., Mendoza, E., & Salazar, L. (2022). Sistema de monitoreo agrometeorológico basado en IoT y arquitectura cliente-servidor para el cultivo de Theobroma cacao L. *Revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática*, 19(2), 45–58. doi:<https://doi.org/10.37811/risci.v19i2.612>
- Ramírez, K., & Vargas, S. (2022). Criterios metodológicos para la selección de muestras y validación de prototipos en ingeniería. *Revista de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico*, 14(2), 78–91.
- Ray, P., & Mukherjee, M. (s.f.). IoT architectures and embedded device characteristics for smart environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(4), 2710–2722. doi:<https://doi.org/10.1109/TII.2022.3148901>
- Salazar, J., Ramírez, C., & López, Ó. (2023). Gestión integral de residuos peligrosos y optimización de insumos agrícolas mediante agricultura de precisión en viveros de cacao. *Revista Científica Agroecosistemas*, 135–145.
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). La Guía de Scrum: La guía definitiva de Scrum: Las reglas del juego. *Scrum.org*. doi:<https://scrumguides.org/scrum-guide.html>

- Sethi, P., & Sarangi, S. (2021). Internet of Things: Architectures, protocols, and applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1155/2021/9324035>
- Sinha, A., Kumar, P., & Rana, K. (2022). Internet of Things: Architectures, protocols, and hardware integration. *Springer*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-98123-4>
- Stallings, W. (2023). *Comunicaciones y redes de computadores*. Pearson Hispanoamérica.
- Tanenbaum, A., & Van Steen, M. (2021). *Sistemas distribuidos: Principios y paradigmas* (4.^a ed. ed.). Pearson Educación.
- Toledo, M., Wanger, T., & Tschardtke, T. (2021). Neglected ecosystem services in cocoa agroforestry: Pollination, pest control, and soil biodiversity. *Biological Conservation*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109108>
- Vargas, D. (2023). Sistemas de información distribuida y su papel en el monitoreo microclimático: Un análisis histórico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 88–103. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2023-03-04>
- Vera, M., Zambrano, J., & Castro, R. (2022). Estrategias de control integrado para la reducción de la incidencia de *Moniliophthora roreri* en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2). doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2610
- Zambrano, F., Vera, K., & Mendoza, D. (2023). Eficiencia en la aplicación de riego y nutrición en plántulas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero. *Revista Científica Agroecosistemas*, 11(1), 102–111.
- Zhang, L., Chen, Y., & Wang, H. (2022). Embedded hardware design and layer architecture for Internet of Things sensing nodes. *IEEE Sensors Journal*, 22(14), 13850–13862. doi:<https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3181204>

ANEXOS

Anexo A: Asignación de tutor

Anexo A: Asignación de tutor

**Uleam**
UNIVERSIDAD LAICA
ELOY ALFARO DE MANABÍ

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí

**Periodo 2025-2 - Notificación de tutor asignado - SOFTWARE
2024 - NS - (EL CARMEN)**

Estimad@
Docente y Estudiante
Uleam

En cumplimiento de lo establecido en la Ley, el Reglamento de Régimen Académico y las disposiciones estatutarias de la Uleam, por medio de la presente se oficializa la dirección y tutoría en el desarrollo del Trabajo de Integración curricular / Trabajo de Titulación del siguiente estudiante:

Tema: ARQUITECTURA CLIENTE-SERVIDOR CON MICROCONTROLADOR IOT PARA EL MONITOREO AMBIENTAL DEL CULTIVO DE THEOBROMA EN LA GRANJA EXPERIMENTAL DE LA ULEAM EXTENSION EL CARMEN

Estado de aprobación: Aprobado

Tipo de titulación: Trabajo de Integración Curricular

Tipo de proyecto: Trabajo de Integración Curricular / Trabajo de titulación se articula con proyectos y programas de Investigación.

Apellidos y nombres del tutor asignado: AREVALO HERMIDA ROMULO DANILO

Apellidos y nombres del estudiante: LOPEZ LOOR BRYAN DAVID

Carrera: SOFTWARE 2024 - NS - (EL CARMEN)

Periodo de Inducción: Periodo 2025-2

Sírvase cumplir con lo dispuesto en el Manual de Procedimientos de TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO: TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR Y UNIDAD DE TITULACIÓN <https://departamentos.uleam.edu.ec/gestion-aseguramiento-calidad/files/2020/06/PAT-04-Titulacion-de-Estudiantes-de-grado-UIC-y-UT.pdf>

Particular que se informa para los fines consiguientes.

Atentamente,

Comisión Académica y Responsable de Titulación.

Anexo B: Fotografías

Anexo B: Fotografías



Fotografía de la entrevista con el MG. Pedro Nivelá encargado del vivero



Fotografía de la encuesta realizada a los estudiantes de la carrera de Agropecuaria que realizan prácticas en el vivero

Anexo C: Estructura de la entrevista aplicada

Anexo C: Estructura de la entrevista aplicada



1. Desde su experiencia técnica, ¿cuáles son los rangos óptimos de temperatura y humedad que garantizan la supervivencia de la plántula de cacao en su fase inicial?
2. ¿Cómo influye la falta de instrumentos de medición de variables ambientales en la aparición del estrés hídrico y otros problemas observados en las plántulas de cacao?
3. ¿Cree que la falta de monitoreo automatizado de humedad y temperatura en tiempo real contribuye al estrés hídrico de las plantas de cacao? ¿Por qué?
4. ¿Qué indicadores o rasgos físicos en las plántulas le permiten determinar que la gestión de datos ambientales está siendo exitosa o deficiente?
5. ¿Cuáles son los principales problemas que enfrenta el Vivero Lastenia relacionados con la gestión del riego y demás variables ambientales en el cacao?
6. ¿Cuáles son los parámetros técnicos (humedad, temperatura, radiación) que usted considera vitales para el crecimiento óptimo del cacao en esta etapa?
7. ¿Bajo qué criterios se decide la frecuencia de riego y cómo afecta la variabilidad del clima local a esta planificación semanal?
8. ¿Podría describir el procedimiento actual que siguen los estudiantes para registrar las variables ambientales (humedad, temperatura) desde que están en la parcela hasta que el dato llega al repositorio final?
9. ¿Cuál es el impacto de la ausencia de datos históricos en la ejecución de un control fitosanitario preventivo y eficiente contra las plagas del sector?
10. ¿Cuáles son las estrategias de comunicación que se utilizan para resolver anomalías críticas entre los estudiantes y la dirección técnica cuando no hay presencia física en el sector Lastenia Vera?
11. ¿De qué manera se verifica hoy que los datos recolectados por los estudiantes sean consistentes y no presenten duplicidades antes de ser analizados?
12. ¿Qué consecuencias puede traer el desconocimiento de los estudiantes acerca de los rangos óptimos de riego y fertilización y como afectan la salud de las plántulas de Teobroma cacao?
13. ¿Qué datos históricos o registros maneja el vivero sobre el consumo de agua, temperatura y demás datos ambientales, así como la mortalidad de plántulas por causas hídricas?

Anexo D: Evidencia de aplicación de encuestas

Anexo D: Evidencia de aplicación de encuesta

Preguntas para Encuesta

1. ¿Considera usted que los costos actuales de mano de obra para monitoreo manual en el vivero de cacao son excesivos y justifican automatización?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo
☐ Muy en desacuerdo

2. ¿Cree que un sistema IoT requeriría menos mantenimiento diario que las mediciones manuales con termómetros y higrómetros?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo
☐ Muy en desacuerdo

3. ¿Estaría de acuerdo en que la integración de sensores de pH del suelo mejoraría el control nutricional de las plántulas?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo
☐ Muy en desacuerdo

4. ¿Considera que la falta de monitoreo nocturno actual expone a las plántulas a riesgos climáticos invisibles?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo

☐ Muy en desacuerdo

5. ¿Qué tan necesario considera que el sistema genere reportes automáticos semanales para técnicos del vivero?

☐ Totalmente necesario
☐ Necesario
☐ Moderadamente necesario
☐ Poco necesario
☐ Nada necesario

6. ¿Cree que monitorear CO2 ambiental ayudaría a optimizar la fotosíntesis en viveros de Theobroma cacao?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo
☐ Muy en desacuerdo

7. ¿Considera que este sistema facilitaría investigaciones estudiantiles sobre cambio climático local en Manabí?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo
☐ Muy en desacuerdo

8. ¿Estaría de acuerdo en que capacitar a estudiantes en IoT durante la implementación enriquecería su currículo ULEAM?

☐ Muy de acuerdo
☐ De acuerdo
☐ Neutral
☐ En desacuerdo
☐ Muy en desacuerdo

9. ¿Considera que la conectividad 4G/5G en El Carmen garantiza fiabilidad para monitoreo remoto continuo?

☐ Muy de acuerdo

Forms

ENCUESTA DE PROYECTO MONITOREO AMBIENTAL AUTOMATIZADO - Guardado

Forms tiene una nueva dirección URL: forms.cloud.microsoft. Misma aplicación, mejor seguridad. [Más información](#)

← Volver a las preguntas

Información general sobre respuestas Activo

Respuestas: 89

Puntuación media: 0

Tiempo promedio: 07:08

Conclusiones y acciones

Usa Excel para ver y manipular los resultados con filtros, dinamización y gráficos.

Descargar una copia en Excel

Evidencia de la encuesta: Resultados de la encuesta aplicada a los estudiantes de la carrera de Agropecuaria

Anexo E: Evidencia de aplicación de entrevista

Anexo E: Reporte del sistema antiplagio

**Certificado de análisis**
Compilatio Magister+ | ULEAM-ECU

Proyecto de titulación López - Compilatio
ID : 5f8047bf4504aa4c4ad3d79b7685e6fc5eb1c31

**7%**
Textos sospechosos

Nombre del fichero : Proyecto de Titulación López- Compilatio.docx
Tamaño del archivo original : 1,72 MB
Número de palabras : 28.560

Depositante : Bryan López Loor
Autor : Bryan López Loor
Fecha de depósito : 26 de julio de 2026
Tipo de carga : ori_submission
fecha de fin de análisis : 26 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :




Ing. Danilo Arévalo Hermida
TUTOR DE TITULACIÓN

GLOSARIO

Agroecología: Enfoque holístico de la agricultura que aplica principios ecológicos al diseño y gestión de sistemas agrícolas sostenibles, priorizando la biodiversidad y la reducción de insumos químicos.

Agroquímico: Sustancia química sintética (como fertilizantes, plaguicidas, herbicidas y fungicidas) empleada en la agricultura para prevenir plagas, enfermedades o incrementar el rendimiento de los cultivos.

AWS IoT Core: Servicio en la nube gestionado por Amazon Web Services que permite a los dispositivos conectados interactuar de manera fácil y segura con aplicaciones en la nube y otros dispositivos.

Biopesticida: Producto de control de plagas derivado de materiales naturales como animales, plantas, bacterias o ciertos minerales.

CoAP (Constrained Application Protocol): Protocolo de transferencia en red orientado a objetos diseñado específicamente para ser utilizado en dispositivos de baja capacidad computacional y redes restrictivas en IoT.

Comandos AT: Conjunto de instrucciones en texto plano (que inician con las letras "AT" de *attention*) empleadas para configurar, probar y controlar módulos de comunicación electrónica a través de una interfaz serial.

DHT11 / DHT22: Sensores digitales de bajo costo que integran componentes capacitivos y termistores para medir la humedad relativa del aire ambiental y la temperatura.

DDoS (Distributed Denial of Service): Ataque informático a sistemas de red que intenta hacer que un recurso de servidor o red no esté disponible paralizándolo con un flujo masivo de tráfico desde múltiples fuentes.

Eliofanía: Parámetro meteorológico que mide la duración o el número de horas durante las cuales el sol brilla de forma efectiva en un lugar e intervalo de tiempo determinado.

ESP32: Familia de microcontroladores de bajo costo y bajo consumo de energía con conectividad Wi-Fi y Bluetooth de modo dual integradas, ampliamente utilizados en aplicaciones de IoT.

Estrés Hídrico: Condición fisiológica en la cual la demanda de agua de las plantas supera la cantidad disponible en el suelo, limitando su fotosíntesis, desarrollo radicular y rendimiento general.

Evapotranspiración: Pérdida conjunta de agua de un ecosistema producida por la evaporación directa desde la superficie del suelo y la transpiración biológica a través de las estomas de las plantas.

Gateway: Dispositivo de red que actúa como enlace intermedio entre dos sistemas informáticos que utilizan diferentes protocolos de comunicación o arquitecturas de red.

HTTP (Hypertext Transfer Protocol): Protocolo de la capa de aplicación sin estado que fundamenta el intercambio de información en la World Wide Web mediante la interacción de peticiones y respuestas entre clientes y servidores.

Interoperabilidad: Capacidad de diversos sistemas de información, redes, plataformas o dispositivos para intercambiar datos de forma transparente y operar en conjunto de manera coherente.

Lixiviación: Proceso mediante el cual el agua percola a través del suelo arrastrando y disolviendo nutrientes solubles, minerales o agroquímicos lejos de las raíces de los cultivos hacia acuíferos subterráneos.

Microcontrolador: Circuito integrado programable de alta escala de integración que contiene una CPU, memorias de trabajo (RAM y Flash) y periféricos de entrada y salida dentro de un solo chip.

PlatformIO: Entorno integrado de desarrollo independiente y multisistema enfocado en la programación y depuración de software embebido para microcontroladores.

Trama de Datos: Estructura de transmisión delimitada y organizada a nivel de bits o caracteres que contiene encabezados, identificadores, carga útil (*payload*) e información de control.