



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“MONITOREO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN NOGALES MEDIANTE SENSORES AMBIENTALES Y RASPBERRY PI ZERO 2 EN GRANJA EXPERIMENTAL YUYUCOCHA.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Producción Industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Luis Francisco Altamirano Villalba

DIRECTOR:

Msc. Edgar Alberto Maya Olalla

Ibarra-Ecuador 2026



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1722336508		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Altamirano Villalba Luis Francisco		
DIRECCIÓN:	Víctor y Mideros y Raúl Montalvo		
EMAIL:	lfaltamiranov@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	-	TELÉFONO MÓVIL:	0960020019

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Monitoreo de Evapotranspiración en Nogales mediante sensores ambientales y Raspberry Pi Zero 2 en Granja Experimental Yuyucocha.
AUTOR (ES):	Altamirano Villalba Luis Francisco
FECHA: DD/MM/AAAA	25/02/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR:	MSC. EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA
ASESOR:	MSC. LUIS EDILBERTO SUAREZ ZAMBRANO

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de febrero de 2026

EL AUTOR:

Altamirano Villalba Luis Francisco

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Ibarra, 25 de febrero del 2026

MSC. EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

Msc. Edgar Alberto Maya Olalla

C.C: 1002702197

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por su apoyo constante, comprensión y motivación a lo largo de todo este proceso académico.

A mi madre Nelly, cuyo esfuerzo, ejemplo y dedicación han sido fundamentales en cada etapa de mi formación personal y profesional.

Al Grupo Scout N.º 5 “Taita Imbabura”, por enseñarme valores como el compromiso, la responsabilidad y a no rendirme, que han sido pilares durante esta etapa universitaria.

Y a mis amigos Sergio, Andrés, Fernando y Anthony, por su compañía, experiencias y apoyo durante mi vida estudiantil.

Altamirano Villalba Luis Francisco

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por ser el pilar fundamental en mi formación.

A mi director Edgar Maya y asesor Luis Suárez, quienes fueron también mis docentes y guías que con conocimientos y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo fueron esenciales para lograr mis objetivos planteados.

Altamirano Villalba Luis Francisco

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de titulación desarrolla el diseño e implementación de un sistema de monitoreo ambiental orientado al cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) en plantaciones de nogal, utilizando sensores conectados a una Raspberry Pi Zero 2. El sistema se estructura bajo el modelo de referencia IoT y está conformado por un nodo sensor que recopila variables climáticas en campo y un nodo coordinador que recibe, almacena y procesa la información en tiempo real mediante el modelo FAO Penman-Monteith.

La arquitectura integra sensores para medir temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, precipitación y variables del suelo. Estas mediciones son transmitidas mediante el protocolo MQTT hacia el nodo coordinador, donde los datos se almacenan en una base de datos SQLite organizada en registros cronológicos. A partir de esta información, el sistema calcula automáticamente la evapotranspiración y genera archivos en formato CSV para su visualización y análisis en Power BI.

El desarrollo se realizó siguiendo la metodología en V, permitiendo validar progresivamente el funcionamiento del sistema mediante pruebas unitarias, de integración y pruebas completas en campo. Durante el periodo de evaluación en la Granja Experimental Yuyucocha, el prototipo operó de forma continua, registrando datos coherentes con las condiciones ambientales reales y demostrando la correcta integración entre adquisición, transmisión, almacenamiento y procesamiento de la información.

Además del cálculo de la Evapotranspiración, el sistema proporciona variables complementarias relacionadas con el estado del suelo y la precipitación, lo que amplía las posibilidades de análisis del comportamiento hídrico del cultivo y aporta información útil para la gestión del riego en el contexto agrícola.

Palabras clave: IoT, evapotranspiración, monitoreo ambiental, Raspberry Pi, sensores ambientales, MQTT, agricultura, Penman-Monteith.

ABSTRACT

This thesis develops the design and implementation of an environmental monitoring system focused on calculating reference evapotranspiration (ET_0) in walnut plantations using sensors connected to a Raspberry Pi Zero 2. The system is structured under the IoT reference model and consists of a sensor node that collects environmental variables in the field and a coordinator node that receives, stores, and processes the information in real time using the FAO Penman-Monteith model.

The architecture integrates sensors to measure air temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed, precipitation, and soil conditions. These measurements are transmitted through the MQTT protocol to the coordinator node, where the data are stored in a SQLite database organized in chronological records. Based on this information, the system automatically calculates evapotranspiration and generates CSV files for visualization and analysis using Power BI.

The development followed the V-model methodology, allowing progressive validation through unit tests, integration tests, and full system tests in real field conditions. During the evaluation period at the Yuyucocha Experimental Farm, the prototype operated continuously, recording data consistent with real environmental conditions and demonstrating proper integration between data acquisition, transmission, storage, and processing.

In addition to evapotranspiration calculation, the system provides complementary variables related to soil conditions and precipitation, extending the possibilities for analyzing the water behavior of the crop and supporting irrigation management in agricultural environments.

Keywords: IoT, evapotranspiration, environmental monitoring, Raspberry Pi, environmental sensors, MQTT, agriculture, Penman-Monteith.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	1
1.1.	Tema	1
1.2.	Problema	1
1.3.	Objetivos.....	4
1.3.1.	Objetivo General	4
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	4
1.4.	Alcance.....	4
1.5.	Justificación	7
2.	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1.	Nogales	10
2.1.1.	Comportamiento hídrico	11
2.1.2.	Características del Nogal	12
2.2.	Evapotranspiración	12
2.2.1.	Evaporación	13
2.2.2.	Transpiración	13
2.2.3.	Conceptos de Evapotranspiración.....	15
2.2.3.1.	Evapotranspiración de Referencia	15
2.2.3.2.	Evapotranspiración de un Cultivo bajo Condiciones Estándar.....	16
2.2.3.3.	Coefficiente de Cultivo	17
2.2.4.	Cálculo de Evapotranspiración	18

2.2.4.1.	Ecuación Penman-Monteith.....	18
2.2.5.	Metodología de la medición de la Evapotranspiración.....	22
2.3.	Internet de las Cosas.....	23
2.3.1.	Modelo de Referencia IoT.....	24
2.3.1.1.	Capa de Dispositivo.....	24
2.3.1.2.	Capa de Red.....	25
2.3.1.3.	Capa de apoyo de servicios y aplicaciones.....	25
2.3.1.4.	Capa Aplicación.....	26
2.3.1.5.	Capacidades de Gestión.....	26
2.3.1.6.	Capacidades de Seguridad.....	27
2.4.	Redes de Sensores Inalámbricos.....	27
2.4.1.	Estructura y Funcionamiento.....	28
2.4.1.1.	Elementos principales de una WSN.....	28
2.4.2.	Jerarquía y topologías de red.....	29
2.4.2.1.	Topología en estrella:.....	29
2.4.2.2.	Topología en árbol o jerárquica.....	29
2.4.2.3.	Topología en malla (mesh):.....	29
2.4.3.	Comparativa de tecnologías inalámbricas aplicadas a redes WSN.....	30
2.4.4.	Funcionamiento usual de un ciclo de monitoreo.....	31
2.5.	Dispositivos de medición y adquisición de datos.....	32
2.5.1.	Sensores ambientales.....	33

2.5.2.	Módulos de adquisición de datos	33
2.5.3.	Unidades de procesamiento	34
2.6.	Inteligencia de Negocio.....	36
3.	CAPITULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	38
3.1.	Introducción.....	38
3.2.	Metodología de Desarrollo	38
3.2.1.	Estudio de Requisitos.....	39
3.2.2.	Diseño del Sistema.....	40
3.2.3.	Diseño de Arquitectura	40
3.2.4.	Diseño Modular.....	40
3.2.5.	Programación	40
3.2.6.	Pruebas Unitarias	41
3.2.7.	Pruebas de Integración.....	41
3.2.8.	Pruebas de Sistema.....	41
3.2.9.	Pruebas de Aceptación.....	41
3.3.	Análisis del entorno y requisitos del sistema.....	42
3.3.1.	Entorno de la Granja Experimental Yuyucocha	42
3.3.2.	Estudio de Requisitos.....	44
3.3.2.1.	Requisitos funcionales	45
3.3.3.	Requisitos no funcionales	46
3.4.	Selección de Hardware y Software.....	47

3.4.1. Hardware.....	48
3.4.1.1. Unidad de procesamiento (Raspberry Pi Zero 2).....	48
3.4.1.2. Sensores	50
3.4.1.2.1. Sensor DS18B20	50
3.4.1.2.2. Sensor BME280	51
3.4.1.2.3. Anemómetro WH-SP-WS01.....	52
3.4.1.2.4. Pluviómetro WH-SP-RG.....	54
3.4.1.2.5. Sensor BH1750.....	55
3.4.1.2.6. Sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0.....	57
3.4.1.3. Componentes Adicionales.....	58
3.4.2. Arquitectura	59
3.4.3. Software.....	63
3.4.3.1. Sistema Operativo.....	63
3.4.3.2. Lenguaje de programación.....	64
3.4.3.3. Herramientas complementarias.....	65
3.4.3.3.1. Base de Datos.....	66
3.4.3.3.2. Automatización y scripting	66
3.4.3.3.3. Visualización de datos	66
3.4.3.3.4. Broker MQTT en la Nube	67
3.5. Diseño del sistema.....	68
3.5.1. Diseño modular del hardware	68
3.5.2. Diagramas eléctricos y electrónicos.....	69
3.5.3. Diseño del sistema de adquisición de datos	72
3.5.4. Diseño del sistema de comunicación inalámbrica	73
3.5.4.1. Transmisión desde el nodo sensor	73

3.5.4.2.	Recepción y procesamiento en el nodo coordinador	74
3.6.	Programación del sistema.....	74
3.6.1.	Algoritmo general de adquisición de datos.....	75
3.6.2.	Programación de Sensores	76
3.6.3.	Programación de comunicación inalámbrica	78
3.6.4.	Programación para almacenamiento.....	79
3.6.4.1.	Creación y estructura de la Base de Datos.....	79
3.6.4.2.	Cálculo y resumen diario automatizado.....	79
3.7.	Implementación física del sistema.....	80
3.7.1.	Elaboración de Nodo Sensor y Coordinador.....	81
3.7.2.	Distribución y ubicación de nodos en campo.	84
3.7.3.	Instalación y protección de componentes electrónicos.....	86
3.8.	Diseño de la base de datos	88
3.8.1.	Modelo conceptual (Entidad-Relación).	89
3.8.2.	Diseño lógico (tablas, relaciones y atributos).....	92
3.8.3.	Implementación física (creación y configuración de base de datos).	94
3.9.	Estrategias de prueba preliminares	96
3.9.1.	Definición de pruebas unitarias.....	97
3.9.2.	Definición de pruebas de integración.....	98
3.9.3.	Planificación preliminar de pruebas del sistema.....	100
3.10.	Consideraciones adicionales	102

3.10.1.	Consideraciones sobre mantenimiento y sostenibilidad del sistema.	102
3.10.2.	Estrategias de respaldo y contingencia.	103
4.	CAPITULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	105
4.1.	Descripción del entorno de pruebas en campo	105
4.1.1.	Ubicación del sistema en la plantación de nogales	106
4.1.2.	Periodo de recolección de datos.....	107
4.1.3.	Condiciones ambientales durante las pruebas.....	109
4.2.	Recolección y registro de datos ambientales	110
4.2.1.	Frecuencia de muestreo y volumen de datos generados	111
4.2.2.	Estructura de los registros almacenados en la base de datos	112
4.3.	Verificación del cálculo de evapotranspiración (ET ₀).....	113
4.3.1.	Variables utilizadas en el cálculo.....	114
4.3.2.	Ejemplos de valores calculados de ET ₀	115
4.3.3.	Análisis de coherencia entre variables ambientales y ET ₀	117
4.4.	Visualización y análisis histórico en Power BI	118
4.4.1.	Estructura del panel de visualización.....	119
4.4.2.	Análisis de tendencias de variables ambientales.....	119
4.4.3.	Relación entre variables.....	122
4.4.4.	Análisis histórico de la evapotranspiración	124
4.5.	Evaluación del funcionamiento integral del prototipo	126
4.5.1.	Operación conjunta del nodo sensor y nodo coordinador.....	126

4.5.2.	Estabilidad de la transmisión MQTT durante el periodo de prueba	127
4.5.3.	Comportamiento del almacenamiento y generación de archivos CSV.	128
4.6.	Interpretación agronómica de los resultados	129
4.6.1.	Determinación del coeficiente de cultivo para nogal joven.....	129
4.6.2.	Estimación mensual de la evapotranspiración del cultivo (ETc).....	130
4.6.3.	Análisis del balance hídrico mensual.....	132
4.6.4.	Implicaciones para el manejo hídrico del cultivo	134
4.7.	Discusión de resultados	134
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		137
CONCLUSIONES:		137
RECOMENDACIONES:.....		139
REFERENCIAS		140
ANEXOS		152

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Árbol de Problemas</i>	3
Figura 2. <i>Arquitectura del proyecto</i>	6
Figura 3. <i>Distribución de la pérdida de agua por evapotranspiración entre la evaporación y la transpiración a lo largo del ciclo de crecimiento de un cultivo anual</i>	15
Figura 4. <i>Disposición de variables climáticas en relación con una superficie de referencia para obtención de ET₀ y ETC en base al Coeficiente de Cultivo</i>	17
Figura 5. <i>La variación del coeficiente de cultivo (K_c) a lo largo del crecimiento de las plantas</i>	18
Figura 6. <i>Modelo de Referencia IoT por capas</i>	24
Figura 7. <i>Tipos de Topologías de Red</i>	29
Figura 8. <i>Modelo de Desarrollo Metodología en V</i>	39
Figura 9. <i>Ubicación Granja Experimental Yuyucocha-Ibarra Ecuador</i>	43
Figura 10. <i>Entorno-plantación de Nogales en Granja Experimental Yuyucocha</i>	43
Figura 11. <i>Vista superior Placa Raspberry Pi Zero 2</i>	49
Figura 12. <i>Vista sensor DS18B20</i>	51
Figura 13. <i>Vista sensor BME280</i>	52
Figura 14. <i>Vista anemómetro WH-SP-WS01</i>	53
Figura 15. <i>Vista pluviómetro WH-SP-RG</i>	55
Figura 16. <i>Vista sensor BH1750</i>	56
Figura 17. <i>Vista sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0</i>	58
Figura 18. <i>Arquitectura del proyecto</i>	62
Figura 19. <i>Raspberry Pi OS Lite</i>	64
Figura 20. <i>Logo lenguaje de programación Python</i>	65

Figura 21. <i>Logo Power BI</i>	67
Figura 22. <i>Logo HIVEHQ CLOUD</i>	68
Figura 23. <i>Diagrama Eléctrico</i>	71
Figura 24. <i>Estructura tipo estación meteorológica-Nodo sensor en campo</i>	81
Figura 25. <i>Vista superior de nodo sensor, sensores y caja acrílico de protección</i>	83
Figura 26. <i>Nodo Coordinador, compuesto por placa Raspberry Pi Zero 2, caja de protección y cable de energía</i>	84
Figura 27. <i>Base de la estructura del Nodo Sensor y vista de la caja de protección de elementos electrónicos</i>	86
Figura 28. <i>Nodo sensor ubicado y funcional en campo</i>	87
Figura 29. <i>Modelo Entidad-Relación conceptual del sistema de monitoreo ambiental</i>	91
Figura 30. <i>Niveles de pruebas aplicados al sistema IoT</i>	97
Figura 31. <i>Entorno-plantación nogales</i>	106
Figura 32. <i>Disposición física del nodo sensor y los sensores ambientales en la plantación de nogales</i>	107
Figura 33. <i>Ejemplo de variación de variables ambientales (temperatura ambiente) durante el periodo de pruebas tomado de Power BI</i>	110
Figura 34. <i>Ejemplo de registros almacenados en la base de datos (archivo csv) durante el periodo de pruebas</i>	111
Figura 35. <i>Comportamiento de la evapotranspiración calculada durante el periodo de pruebas tomada de Power BI</i>	114
Figura 36. <i>Relaciones variables medidas-sensores para determinación de ET_o</i>	115
Figura 37. <i>Ejemplos de valores de evapotranspiración calculados a partir de los datos ambientales</i>	116

Figura 38. <i>Relación observada entre variables ambientales registradas y la evapotranspiración calculada.....</i>	118
Figura 39. <i>Comportamiento horario de las variables ambientales registradas en Power BI</i>	121
Figura 40. <i>Comparativa entre grafica del INAMHI y Power BI</i>	122
Figura 41. <i>Relación horaria entre radiación solar global y temperatura del aire...</i>	123
Figura 42. <i>Relación radiación solar y temperatura del aire según estación INAMHI</i>	124
Figura 43. <i>Evolución diaria de la evapotranspiración de referencia (ET₀)</i>	125
Figura 44. <i>Flujo de operación extremo a extremo del sistema.....</i>	127
Figura 45. <i>Archivo CSV exportado automáticamente para la visualización de datos en Power BI.</i>	129

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Características del Nogal</i>	12
Tabla 2. <i>Principales métodos de Cálculo de Evapotranspiración de referencia</i>	21
Tabla 3. <i>Métodos de medición de variables de la Evapotranspiración</i>	23
Tabla 4. <i>Tecnologías de comunicación inalámbrica para redes WSN</i>	31
Tabla 5. <i>Microcontroladores y microcomputadoras comerciales relevantes para sistemas de monitoreo</i>	35
Tabla 6. <i>Principales plataformas de Business Intelligents (BI)</i>	37
Tabla 7. <i>Requisitos funcionales para el sistema de monitoreo</i>	45
Tabla 8. <i>Requisitos no Funcionales para el sistema de Monitoreo</i>	47
Tabla 9. <i>Características placa Raspberry Pi Zero 2</i>	49
Tabla 10. <i>Características sensor DS18B20</i>	51
Tabla 11. <i>Características sensor BME280</i>	52
Tabla 12. <i>Características sensor WH-SP-WS01</i>	54
Tabla 13. <i>Características sensor WH-SP-RG</i>	55
Tabla 14. <i>Características sensor BHI750</i>	57
Tabla 15. <i>Características sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0</i>	58
Tabla 16. <i>Componentes adicionales utilizados en el sistema</i>	59
Tabla 17. <i>Estructura de la tabla lecturas de la base de datos sensores_data.db</i>	93
Tabla 18. <i>Resumen de pruebas de integración</i>	100
Tabla 19. <i>Plan preliminar de pruebas del sistema en campo</i>	102
Tabla 20. <i>Periodo y frecuencia de recolección de datos</i>	108
Tabla 21. <i>Estructura de los registros almacenados en la base de datos durante las pruebas</i>	113

Tabla 22. <i>Verificación de continuidad de transmisión diaria del sistema para la primera semana de enero.....</i>	128
Tabla 23. <i>Evolución diaria estimada de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante enero.....</i>	131
Tabla 24. <i>Comparación entre precipitación diaria y evapotranspiración del cultivo en enero</i>	133

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: <i>Coficiente de Cultivo(Kc).....</i>	17
Ecuación 2: <i>Ecuación Penman-Monteith (ET0)</i>	19
Ecuación 3: <i>Ecuación Penman-Monteith para cálculo para aplicación horaria.....</i>	20
Ecuación 4: <i>Evapotranspiración de cultivo.....</i>	125
Ecuación 5: <i>Rango de Coeficiente de cultivo etapa inicial</i>	130
Ecuación 6: <i>Valor de Coeficiente de cultivo elegido</i>	130
Ecuación 7: <i>Evapotranspiración de Cultivo a calcular.....</i>	130
Ecuación 8: <i>Expresión de balance hídrico</i>	132
Ecuación 9: <i>Cálculo de balance hídrico.....</i>	132

1. CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

1.1. Tema

Monitoreo de Evapotranspiración en Nogales mediante sensores ambientales y Raspberry Pi Zero 2 en Granja Experimental Yuyucocha.

1.2. Problema

En el campus de la Universidad Técnica del Norte, Granja Experimental Yuyucocha, sede de la Carrera en Ingeniería Forestal, se tiene una plantación de árboles de Nogal desde hace 2 años para lo cual en este tipo de planta se requiere ciertos cuidados y monitoreo de variables como humedad según el tipo de suelo, temperatura, flujo hídrico en la tierra, entre otros.

El proceso de evapotranspiración en el Nogal comprende gran importancia en su crecimiento ya que debe garantizar ya sea como madera y/o producción de su fruto como producto final sea de calidad y en base a las directrices para su producción como el uso de buen material vegetal, una poda y manejo adecuados del agua en su riego ayudan a dar tener un crecimiento controlado y óptimo para cualquier fin de producción que se le dé al Nogal (Aletà & Vilanova, 2006).

En Imbabura, el Nogal es altamente utilizado como materia prima de la elaboración de Artesanías en San Antonio. Según una encuesta realizada por Quelal (2018) hacia los Artesanos de San Antonio, el Nogal es el segundo tipo de madera más utilizada para las artesanías. Donde la mayoría de los artesanos el adquirir el Nogal como materia prima viene en su mayoría del Oriente y lugares ajenos a la Provincia de Imbabura, para ello al no haber poblaciones nativas de este ejemplar es ideal implementar plantaciones de esta especie donde obtener el estudio adecuado de cómo es el consumo de agua y su proceso de evapotranspiración es esencial para realizar plantaciones en la Provincia y así incentivar su producción (Rueda, 2018).

Según Anaya-Isaza et al. (2016), la evapotranspiración comprende la unión de los procesos de evaporación la cual hace que el agua en estado líquido se convierta en vapor donde con la presencia de la radiación de sol, temperatura, humedad del suelo y atmosférica son variables que contribuyen al proceso de evapotranspiración. Y la transpiración que por medio de las estomas de las hojas de las plantas permite vaporizar el agua en estado líquida dentro de los tejidos de la planta y así hacer su remoción a la atmosfera.

El ejercicio de tener un ambiente controlado del cultivo equivale al buen estudio de la evapotranspiración donde este conocimiento es crítico para gestionar estudios de riego y tener un estimado del balance hídrico que se debe manejar teniendo en cuenta como es el flujo natural del agua en el suelo, cuánta agua llega a consumir en un periodo definido de tiempo, la cantidad de agua que necesita y así saber cuánto absorbió el suelo, que cantidad se evaporó y cuanto transpiró el Nogal (Jimenez-Berni et al., 2023).

No solo la falta de agua afecta al crecimiento del nogal, sino que el exceso de agua también puede tener efectos perjudiciales en los árboles. En ciertas situaciones, el exceso de agua en el suelo puede causar más daño que la falta de agua, afectando negativamente la salud y el desarrollo del nogal. Es fundamental mantener un equilibrio adecuado de humedad para asegurar un crecimiento saludable del nogal y evitar problemas tanto por déficit como por exceso de agua. Además, la gestión adecuada del riego y el drenaje es crucial para prevenir enfermedades y asegurar la estabilidad del ecosistema donde crecen estos árboles (Van Schouwen & Ferreyra, n.d.).

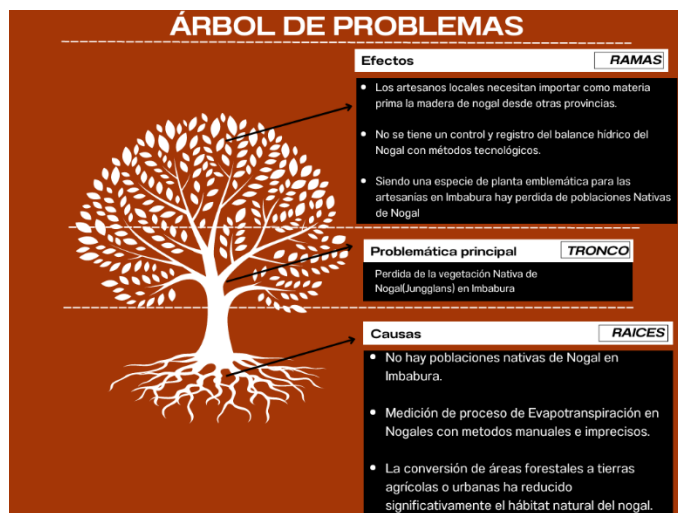
El propósito de este proyecto es desarrollar un sistema capaz de medir el potencial hídrico del suelo, es decir, la energía con la que el agua es retenida en el perfil edáfico, con el

fin de comprender la disponibilidad y el movimiento natural del agua en el entorno agrícola. Además, se busca obtener mediciones que permitan caracterizar el comportamiento del proceso de evaporación desde la superficie del suelo, así como estimar la pérdida de agua total por evapotranspiración en los cultivos de nogal. Esta información permitirá analizar con mayor precisión la relación entre las condiciones ambientales y la demanda hídrica del cultivo, facilitando así la evaluación de la factibilidad de su implementación y siembra en la región.

En la Figura 1 se indican las causas y efectos del problema detectado estructurado en un árbol de problemas:

Figura 1.

Árbol de Problemas



Nota. Elaboración Propia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo de evapotranspiración en nogales para analizar la factibilidad de la producción de cultivos de nogales y su balance hídrico.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un análisis bibliográfico acerca del proceso de evapotranspiración en el Nogal y variables a medir para estudio que comprende este proceso.
- Establecer requerimientos para el diseño del sistema de monitoreo en plantación de Nogales identificando los problemas y territorio a evaluar.
- Construir el sistema de monitoreo en la plantación de Nogales de la Granja Experimental Yuyucocha donde facilite la lectura de datos y transmisión inalámbrica en tiempo real hacia una base de datos para su posterior visualización.
- Desarrollar pruebas para evaluar la factibilidad de la implementación de cultivos de Nogales analizando los datos obtenidos en relación con la Evapotranspiración.

1.4. Alcance

Para el desarrollo del proyecto se adoptará la Metodología de Modelo en V, este modelo tiene el enfoque de desarrollo de sistemas y software que enfatiza una relación directa entre las fases de desarrollo y las fases de prueba. Se visualiza como una "V", donde cada fase de desarrollo (como los requisitos, el diseño y la implementación) en el lado descendente de la "V" tiene una fase correspondiente de verificación y validación (como las pruebas unitarias, de integración y de aceptación) en el lado ascendente. Este modelo permitirá asegurar en este proyecto que cada etapa de desarrollo esté vinculada a su respectiva etapa de prueba, promoviendo una validación sistemática y rigurosa del sistema desde los requisitos iniciales hasta el producto final (Sosa-Savedra et al., 2023).

El presente trabajo de integración curricular propone implementar un sistema que permita monitorear el proceso de evapotranspiración en una plantación de junglans (Nombre antiguo del Nogal) en la Granja Experimental Yuyucocha-UTN para así examinar y estudiar el comportamiento del ejemplar para implementación de plantaciones en la Provincia de Imbabura como incentivo de siembra de poblaciones nativas en la región. El proyecto se secciona en 4 fases las cuales se detalla a continuación:

En la primera fase se realizará el estudio y análisis teórico referente a como es el comportamiento del proceso de Evapotranspiración del Nogal. Comprender las variables que se deben considerar para medir tanto el proceso de evaporación y transpiración de la planta de tal forma que se pueda recomendar medidas de optimización del riego, manejo efectivo de Recursos Hídricos e investigación de desarrollo agrícola conociendo la cantidad de agua que el Nogal consume por la pérdida a través de la evaporación y traspiración. Además de examinar los dispositivos de hardware que se va a implementar en los distintos nodos de la arquitectura.

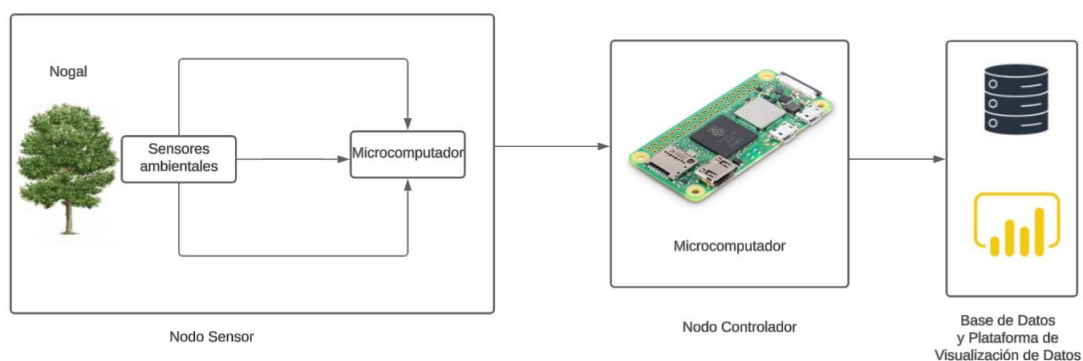
En la segunda fase, se instalará los dispositivos (sensores y microcomputadores) en el espacio de plantación de Nogales en la Granja Experimental Yuyucocha. El nodo sensor se encargará de recopilar y censar datos como, humedad y temperatura del suelo y aire, radiación solar, velocidad del viento y nivel de precipitación. Estos sensores serán administrados por un microcomputador, sus datos serán enviados de manera inalámbrica hacia el Nodo Controlador. Posteriormente en el Nodo Controlador que cuenta con un microcomputador para su recepción, se tendrá el procesamiento total de los datos recopilados para ser llevados a una base de datos.

En la Figura 2 se detalla la arquitectura preliminar a diseñar e implementar para el desarrollo del proyecto, donde cuenta con 2 nodos (sensor y controlador). En el nodo sensor cuenta con dispositivos de sensores ambientales que tomarán los datos del Nogal sembrado

procesados por un microcomputador encargado de receptor los datos censados. Luego se envían estos datos hacia el nodo controlador que cuenta con otro microcomputador encargado de receptor los datos y administrar el histórico de la información obtenida asociándola a una base de datos. Además, se asociará con herramientas de Inteligencia de Negocios (BI) donde con la información revelada servirá para la toma de decisiones a futuro por parte de la Comunidad Universitaria de la Granja Experimental Yuyucocha para el estudio de la evapotranspiración en el Nogal.

Figura 2.

Arquitectura del proyecto



Nota. Elaboración Propia.

La tercera fase contempla el periodo destinado a la recolección y registro de datos. Para ello, se ha definido que la recopilación y almacenamiento de las variables medidas se llevará a cabo durante un tiempo prudente, determinado según recomendaciones técnicas y criterios profesionales. Este periodo será ajustado en función de factores como la temporada ambiental en la que se desarrollen las pruebas, la periodicidad y frecuencia de toma de datos, así como la posible pérdida de muestras debido a fallos de conectividad o interrupciones en la alimentación del circuito. Durante este tiempo, el prototipo permanecerá en operación continua, brindando utilidad a la comunidad universitaria de la Granja Experimental Yuyucocha.

Por último, en la cuarta y última fase se procesará toda la información obtenida y se desarrollará un estudio y análisis de cómo ha sido el rendimiento de los Nogales, para así estimar recomendaciones de la gestión de los recursos hídricos, para el correcto tratamiento de los ejemplares. Se indicará los resultados obtenidos a través de una API donde se muestren los estudios históricos de los datos, además, de demostrar que el sistema sigue funcional para la toma y censado de datos en tiempo real, para futuros análisis. Finalmente se presentará conclusiones y recomendaciones en beneficio del desarrollo de implementación de nuevas plantaciones de Nogales en Imbabura.

1.5. Justificación

En el sector forestal hay un gran aporte en la generación de empleos para el desarrollo de artesanías (73.440 empleos) y en la industria forestal y maderera (126.268) (Ministerio de Agricultura, n.d.). Donde impulsar el crecimiento de plantaciones forestales de Nogal como población nativa en Imbabura puede mejorar en beneficio de la adquisición de materia prima para el artesano en negocios de elaboración de artesanías en San Antonio. Según Villota et al. (2024) “el Nogal es una especie nativa muy apreciada en el sector forestal, debido a su coloración y fácil trabajabilidad, por lo que es utilizada para mueblería, artesanías, revestimientos decorativos, entre otros” (p. 2).

Además, se promueve los planes y programas de aprovechamiento forestal en áreas y regiones que están en crecimiento de cobertura de bosques dando un impacto ambiental y ecológico dado el estudio de factibilidad de crecimiento en población de Nogales para la provincia (MAE, n.d.).

El implementar una solución tecnológica integrada que beneficie a la obtención de datos para el estudio adecuado de los procesos y variables que implica la evapotranspiración en el junglans permite conocer y establecer estrategias de un manejo y control adecuado de los recursos hídricos para este ejemplar dando en su crecimiento y producción soluciones acertadas óptimas para sus cuidados y tratamientos. Además, de que el método a implementar puede ser utilizado para otros tipos de plantas que se requiera analizar el proceso de evapotranspiración para su estudio correspondiente.

Con la información recolectada y procesados se puede llegar a hacer ajustes en el riego de manera más precisa evitando el estrés hídrico como el exceso de humedad en el suelo ejecutando decisiones más informadas acerca de la gestión de los recursos hídricos, especialmente en regiones donde el agua es escasa o se enfrenta a problemas de sequía. Con el conocimiento de la evapotranspiración se puede ayudar a predecir el rendimiento de los Nogales en diferentes condiciones ambientales y específicamente en Ibarra-Imbabura para la planificación de la producción agrícola a largo plazo.

Con este proyecto se puede impulsar a la investigación científica-académica dando la comprensión de lo útil de las tecnologías y los beneficios que esta trae para la innovación de soluciones que potencien el estudio e investigación de nuevos métodos, como en este caso, para el proceso de evapotranspiración para así dar un impacto social-ambiental. Además, que para la comunidad Universitaria de la Granja Experimental Yuyucocha, el prototipo será de utilidad para la investigación y análisis de datos conforme la plantación de los Nogales siga creciendo.

Al realizar este estudio sobre la evapotranspiración en nogales se garantiza el promover la gestión sostenible de los recursos hídricos y la conservación de los suelos, siendo aspecto clave del 15° Objetivo de Desarrollo Sostenible de la ONU. Este objetivo aboga por la protección y restauración de los ecosistemas terrestres, y un manejo adecuado del riego, basado en datos precisos de evapotranspiración, ayuda a prevenir la degradación del suelo y la desertificación. Además, optimizar el uso del agua contribuye a la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático, asegurando así que las prácticas agrícolas sean sostenibles y que los recursos naturales sean utilizados de manera eficiente (ONU, n.d.).

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El presente capítulo presenta el marco teórico que sustenta la investigación necesaria para desarrollar el trabajo de grado. Se abordarán conceptos fundamentales relacionados con la fisiología de los nogales, evapotranspiración, Internet de las Cosas, Redes Inalámbricas e inteligencia de negocios, todo aplicados en la agricultura de precisión, entre otros. Además, se revisarán estudios previos y metodologías empleadas para el cálculo de Evapotranspiración bajo parámetros variados, proporcionando un contexto académico y científico que respalde la relevancia y la innovación de esta investigación.

2.1. Nogales

Los nogales pertenecen al género *Juglans* y son conocidos por producir nueces, un fruto seco de alto valor comercial. Estas plantas son árboles caducifolios que pueden alcanzar alturas de hasta 30 metros y tienen un sistema radicular profundo y extenso. Las hojas de los nogales son pinnadas y grandes, lo que les permite captar una gran cantidad de luz solar para la fotosíntesis. Los nogales tienen un ciclo de vida largo, comenzando con una fase de crecimiento juvenil antes de entrar en la etapa de producción de frutos. La floración ocurre en primavera, seguida de la polinización, que en muchas especies es anemófila, es decir, mediada por el viento. El fruto, la nuez, madura en otoño y está protegida por una cáscara dura y una envoltura carnosa llamada pericarpio (Aletà & Vilanova, 2006).

En el Ecuador, especialmente en la provincia de Imbabura, se ha observado un interés creciente por su implementación en proyectos agroforestales y de agricultura de precisión, en parte debido al aprovechamiento de la madera para actividades artesanales (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2020). Sin embargo, el cultivo de nogal exige condiciones

agroclimáticas específicas, por lo que es necesario un monitoreo constante de las variables ambientales que inciden directamente en su crecimiento y productividad.

2.1.1. Comportamiento hídrico

El nogal prospera en climas templados con inviernos fríos y veranos cálidos y secos. Requiere una acumulación mínima de horas frío (entre 600 y 1500 horas anuales por debajo de 7 °C) para una brotación uniforme, así como una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C (P. Rodríguez et al., 2018). El exceso de humedad o las lluvias prolongadas durante la floración pueden afectar la polinización y favorecer la aparición de enfermedades fúngicas.

En cuanto a suelos, esta especie se desarrolla mejor en terrenos profundos, bien drenados, con pH neutro o ligeramente alcalino (entre 6.5 y 7.5), evitando suelos compactados o con salinidad alta (Bielsa & Jiménez, 2019). Además, presenta una sensibilidad particular al exceso o déficit hídrico, por lo que la planificación del riego resulta crítica para su adecuado manejo.

El nogal, debido a su gran tamaño y extenso sistema foliar, tiene altos requerimientos hídricos esenciales para su crecimiento y producción de frutos. La disponibilidad de agua es crucial, especialmente durante períodos de sequía, ya que el estrés hídrico puede afectar negativamente la cantidad y calidad de las nueces. Por lo tanto, los nogales necesitan un riego regular y adecuado, que varía según la etapa de desarrollo del árbol, las condiciones climáticas y el tipo de suelo. Un manejo eficiente del riego, basado en el monitoreo de la evapotranspiración y el estado hídrico del suelo, es fundamental para asegurar la productividad y sostenibilidad de las plantaciones.

2.1.2. Características del Nogal

En la Tabla 1, se detalla aspectos generales y relevantes acerca del nogal:

Tabla 1.

Características del Nogal

Nogal	Descripción
Tipos	Varietades principales: Chandler, Howard, Tulare, Vina, Serr, Franquette.
Clima Ideal	Climas templados, inviernos fríos (400-1500 horas de frío), veranos cálidos y secos.
Suelo	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos (pH 6-7). La especie no tolera suelos pesados, mal drenados y con poca retención de agua
Plantación	Época: Primavera Espaciado: 6-7 metros entre árboles en sistemas de alta densidad; 7-9 metros en sistemas tradicionales
Riego	Métodos: Goteo, microaspersión. Se recomienda mantener humedad constante sin encharcar.
Fertilización	Nutrientes clave: Nitrógeno(primavera), Fósforo (desarrollo de raíces) y Potasio (desarrollo de frutos)
Poda	Se debe aplicar poda de formación en los primeros años y poda de mantenimiento anual con el objetivo de eliminar ramas muertas o enfermas para mejorar la aireación y la luz.
Cosecha	Métodos: Manual o mecánica. Época: Otoño, cuando la cáscara empieza a abrirse. Rendimiento: Acorde a la edad del árbol, condiciones climáticas y de cultivo.
Plagas y Enfermedades	Plagas Comunes: Gusano de manzana, ácaros, barrenador. Enfermedades: Antracnosis, bacteriosis, pudrición de raíces. Control: Fungicidas adecuados, monitoreo regular y uso de pesticidas.
Producción	Un árbol adulto produce entre 25-40kg de nueces por año.
Mercado	Internacionalmente demandado por la implementación de su madera para artesanías y muebles. Exportación y consumo de nueces.

Nota. Adaptado de *El cultivo del nogal en climas templado-fríos* (Iannamico, 2006).

2.2. Evapotranspiración

Para los nogales, entender y monitorear la evapotranspiración permite a los productores de nogales ajustar los programas de riego de manera óptima asegurando que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua sin exceso ni déficit. Un riego adecuado no solo optimiza el crecimiento y la salud del nogal, sino que también mejora la calidad y cantidad de la producción de nueces y calidad de la madera. Dado que los nogales tienen requerimientos hídricos específicos y son sensibles a las condiciones de humedad del suelo, definir cómo actúa el

proceso de evapotranspiración en los nogales es esencial para mantener un balance hídrico ideal y prevenir problemas como la pudrición de raíces o el estrés hídrico.

La evapotranspiración, que integra la evaporación desde la superficie y la transpiración de las plantas, conecta el ciclo hidrológico terrestre con los ciclos del carbono y el intercambio energético. Es esencial para mantener el equilibrio hídrico y térmico en diversas superficies como la terrestre, lacustre o fluvial, y se considera un parámetro crucial en la ciencia del sistema terrestre. En esencia, la evapotranspiración real puede interpretarse como una indicación de la demanda atmosférica de humedad de una superficie y la capacidad de esa superficie para proporcionar dicha humedad (Liu et al., 2018).

La evapotranspiración comprende la combinación de dos procesos y se los define como:

2.2.1. Evaporación

La evaporación, que transforma el agua líquida en vapor, ocurre en superficies como lagos, ríos, suelos y vegetación mojada, y requiere energía proporcionada por la radiación solar y la temperatura del aire. Este proceso depende de la diferencia en la presión de vapor entre la superficie y la atmósfera, y se desacelera a medida que el aire circundante se satura, a menos que el aire húmedo sea reemplazado por aire seco, lo cual depende de la velocidad del viento. Factores adicionales que afectan la evaporación del suelo incluyen la cobertura del suelo por cultivos y la disponibilidad de agua, influenciada por lluvias, riego y ascenso capilar. En condiciones donde el suelo no puede suministrar agua rápidamente, la evaporación se reduce y puede cesar completamente en ausencia de reabastecimiento de agua (Allen et al., 2006).

2.2.2. Transpiración

La transpiración es el proceso mediante el cual el agua contenida en los tejidos de las plantas se evapora y es liberada a la atmósfera, principalmente a través de las estomas en las hojas. Este proceso, similar a la evaporación, depende de la energía solar, el gradiente de

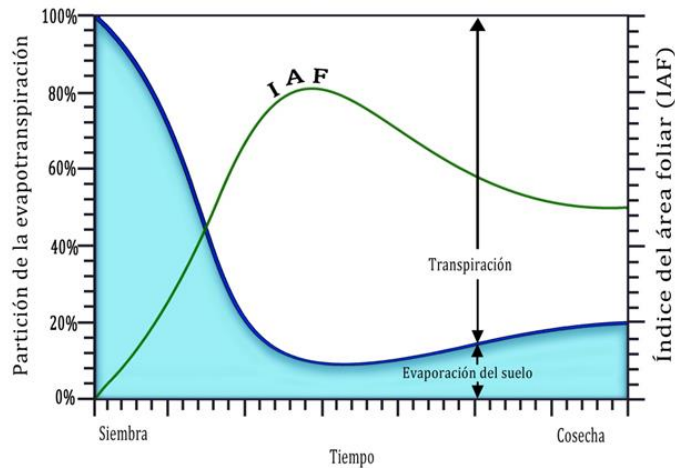
presión de vapor y la velocidad del viento, y está influenciado por factores como la radiación, la temperatura del aire, la humedad y el viento. La absorción de agua por las raíces y su transporte a través de la planta también juegan un papel crucial, al igual que el contenido de agua del suelo y su capacidad de conducir agua, la salinidad y las prácticas de cultivo. Además, las características del cultivo, su entorno y su manejo son determinantes en la tasa de transpiración (Allen et al., 2006).

A medida que el ciclo del cultivo progresa, la fracción de agua perdida por evaporación directa del suelo disminuye, mientras que la sombra proyectada por el dosel del cultivo sobre el suelo aumenta. Durante las primeras etapas del crecimiento del cultivo, la mayor parte del agua se pierde a través de la evaporación directa del suelo. Sin embargo, conforme el cultivo se desarrolla y eventualmente cubre completamente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso predominante.

La Figura 3 indica la distribución de la evapotranspiración en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el índice de área foliar (IAF) sobre la superficie del suelo a lo largo del tiempo. Al momento de la siembra, casi el 100% de la evapotranspiración ocurre por evaporación. En contraste, cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la evapotranspiración se debe a la transpiración. Este comportamiento subraya la importancia de factores como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento en el proceso de evapotranspiración.

Figura 3.

Distribución de la pérdida de agua por evapotranspiración entre la evaporación y la transpiración a lo largo del ciclo de crecimiento de un cultivo anual



Nota: Tomado de *Proceso de evapotranspiración (evaporación y transpiración del cultivo)* (Ingenium, 2021).

2.2.3. Conceptos de Evapotranspiración

Previo a definir como se realizar el cálculo de la evapotranspiración, hay varios conceptos que permiten conocer y entender el desarrollo de estos cálculos:

2.2.3.1. Evapotranspiración de Referencia

La evapotranspiración de referencia, ET_0 , se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia con un cultivo herbáceo ideal en crecimiento constante y con suficiente agua. Esta superficie está caracterizada por valores definidos de resistencia aerodinámica y a la resistencia de la superficie (Belmonte, 2005).

El concepto de evapotranspiración de una superficie de referencia surge para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera, independientemente del tipo de cultivo y su estado de desarrollo. La ET_0 proporciona un patrón que puede referirse a otras superficies bajo condiciones climáticas similares (Belmonte, 2005). Esto permite comparar valores de ET_0

calculados en distintos lugares o estaciones. Además, los factores climáticos afectan a la ET_0 , ya que expresa la demanda evaporativa de la atmósfera en un lugar específico y en un momento determinado, sin considerar otros factores.

En la Figura 4 se indica como se obtiene la ET_0 en base a la adopción de los distintas variables climáticas y meteorológicas en función de una superficie de referencia.

2.2.3.2. Evapotranspiración de un Cultivo bajo Condiciones Estándar

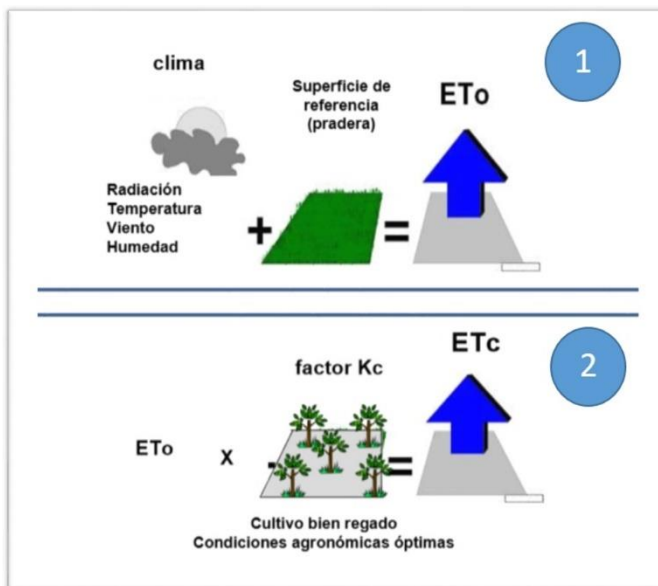
Según Belmonte (2005) la evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar (ET_C) se define como la cantidad de agua perdida por la combinación de evaporación del suelo y transpiración de las plantas en un cultivo sano, bien nutrido y bajo condiciones óptimas de agua, para maximizar la producción. La ET_C varía según la fase de crecimiento del cultivo y también se conoce como la evapotranspiración máxima (ET_M) en un momento específico. Este parámetro es crucial para determinar las necesidades hídricas de los cultivos.

Las necesidades hídricas de un cultivo son la cantidad de agua necesaria para compensar la pérdida por evapotranspiración. Este valor incluye tanto la evapotranspiración del cultivo como sus necesidades hídricas en un mismo periodo, aunque el término comúnmente se refiere a la cantidad de agua a suministrar. Las necesidades de riego, por otro lado, consideran no solo la evapotranspiración y la precipitación efectiva, sino también la necesidad de agua adicional para el lavado de sales y para asegurar una distribución uniforme del agua en el sistema de riego (Martínez-Cob, 2004).

La Figura 4 indica la ET_C como resultado de asociar la ET_0 y el Coeficiente de Cultivo que se detalla en el siguiente apartado:

Figura 4.

Disposición de variables climáticas en relación con una superficie de referencia para obtención de ET_0 y ET_C en base al Coeficiente de Cultivo



Nota: Tomado de *Evapotranspiración y K_c (parte II)* (Monge, 2019).

2.2.3.3. Coeficiente de Cultivo

El coeficiente de cultivo, K_C , se define como el cociente entre la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar, ET_C , y la evapotranspiración de la superficie de referencia, ET_0 :

Ecuación 1: *Coeficiente de Cultivo(K_c)*

$$K_C = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (1)$$

El coeficiente de cultivo refleja las características que diferencian un cultivo específico de la superficie de referencia. Estas características incluyen:

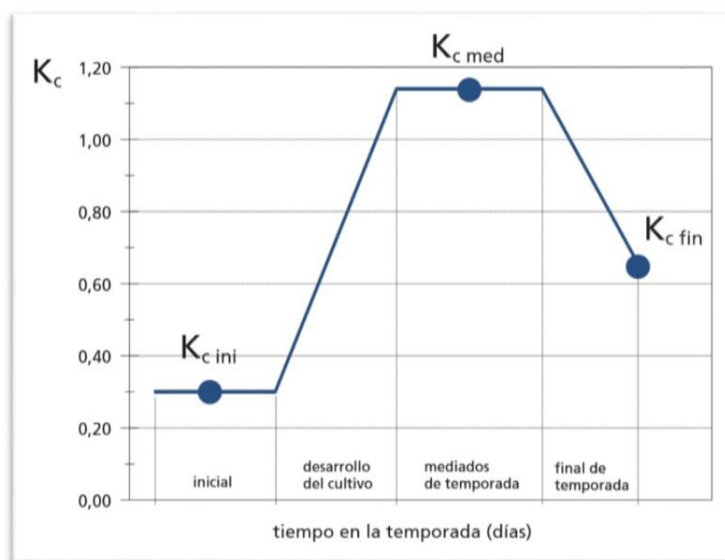
- 1) La altura del cultivo, que afecta la resistencia aerodinámica.
- 2) El albedo de la cubierta, que influye en la radiación solar absorbida.

3) El grado de control estomático, que afecta la resistencia al flujo de vapor de agua desde la superficie vegetal y del suelo.

Dado que estas características cambian a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo, el K_c varía en el tiempo, describiendo una curva que refleja estos cambios. La Figura 5 ilustra un ejemplo de evolución temporal del K_c dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo:

Figura 5.

La variación del coeficiente de cultivo (K_c) a lo largo del crecimiento de las plantas



Nota: Tomado de *Evapotranspiración y K_c (parte II)* (Monge, 2019).

2.2.4. Cálculo de Evapotranspiración

Para la estima y cálculo de la Evapotranspiración existen varios métodos de cálculo donde dependiendo de las características meteorológicas, tipo de cultivo y suelo se aplica el modelo adecuado. Seguidamente se presenta principales métodos de cálculo:

2.2.4.1. Ecuación Penman-Monteith

La ecuación de Penman-Monteith se utiliza para determinar la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de datos meteorológicos o de un tanque evaporímetro. Este método, establecido por la FAO, es un estándar para el cálculo de la ET_0 y se basa en diversas variables climáticas

y del cultivo. La ecuación proporciona un valor estándar que puede usarse para comparar la evapotranspiración en diferentes períodos del año y regiones, además de relacionarse con la de otros cultivos (Allen et al., 2006).

Ecuación 2: *Ecuación Penman-Monteith (ET_0)*

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

En donde:

- ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm/día).
- R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²día).
- G es el flujo de calor del suelo (MJ/m²día).
- T es la temperatura media diaria del aire a 2 m de altura (°C).
- u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).
- e_s es la presión de vapor de saturación (kPa).
- e_a es la presión de vapor actual (kPa).
- Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C).
- γ es la constante psicrométrica (kPa/°C).

Teniendo en cuenta el mismo método, existe un cálculo lo cual permite obtener la ET_0 , por lo que el cálculo de la ET_0 por periodos horarios es más preciso en áreas donde se producen cambios significativos en la velocidad del viento, la temperatura del punto de condensación o la nubosidad durante el día. Aunque los datos de 24 horas suelen ser suficientes, las variaciones horarias pueden introducir errores. Con las estaciones meteorológicas automáticas modernas, se pueden obtener datos en periodos horarios o incluso más cortos, permitiendo un cálculo más preciso con la ecuación de Penman-Monteith. Esta ecuación se puede ajustar para cálculos

horarios, proporcionando buenos resultados al adaptar los procedimientos a los intervalos de tiempo utilizados (Allen et al., 2006).

Ecuación 3: *Ecuación Penman-Monteith para cálculo para aplicación horaria*

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3)$$

En donde:

- ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm/hora).
- R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²hora).
- G es la densidad del flujo de calor del suelo (MJ/m²hora).
- T_{hr} es la temperatura media del aire cada hora (°C).
- γ es la constante psicrométrica (kPa/°C).
- $e^0(T_{hr})$ es la presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} (kPa).
- u_2 es el promedio horario de la velocidad del viento (m/s).
- e_a es el promedio de la presión real de vapor (kPa).
- Δ es la pendiente de la curva de saturación de vapor en T_{hr} (kPa/°C).

A partir de este modelo de cálculo Penman-Monteith existen otros métodos de Cálculo de la ET_0 . En la Tabla 2 se indica los métodos principales que existen para el Cálculo de ET_0 descartando la ya presentada:

Tabla 2.*Principales métodos de Cálculo de Evapotranspiración de referencia*

Método	Ecuación	Parámetros
Hargreaves	$ET_0 = 0,0023(T_{max} - T_{min})^{0,5}(T_{mean} + 17,8)R_a$	<p>ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/día) T_{max}: Temperatura máxima diaria (°C) T_{min}: Temperatura mínima diaria (°C) T_{mean}: Temperatura media diaria (°C) R_a: Radiación extraterrestre (MJ/m²día)</p>
Blaney-Criddle	$ET_0 = \rho \times (0,46T_{mean} + 8,13)$	<p>ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/día) ρ : Porcentaje de horas diarias de luz solar respecto al total anual T_{mean}: Temperatura media diaria (°C)</p>
Thornthwaite	$ET_0 = 16 \left(\frac{10T_{mean}}{I} \right)^\alpha$	<p>ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/mes) T_{mean}: Temperatura media mensual (°C) I: Índice de calor mensual (suma de $(T_{mean}/5)^{1,514}$ para todos los meses del año)</p>
Priestly-Taylor	$ET_0 = \alpha \left(\frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \right)$	<p>α: Coeficiente Empírico ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/día) α: Coeficiente Empírico (usualmente 1,26) R_n : Radiación neta (MJ/m²día) G: Flujo de calor del suelo (MJ/m²día) Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C) γ : Constante psicrométrica (kPa/°C)</p>

Tanque Evaporímetro (Clase A)	$ET_0 = K_p \times E_t$	ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/día) K_p : Coeficiente de tanque E_t : Evaporación del tanque (mm/día)
Jensen-Haise	$ET_0 = (T_{mean} - T_b)R_s$	ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm/día) T_{mean} : Temperatura media diaria (°C) T_b : Temperatura base (°C, típicamente 0 °C) R_s : Radiación solar (MJ/m ² día)

Nota: Información extraída, resumida y recuperada de: *Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco* (Ortiz & Chile, 2020).

Según el artículo de investigación de Rodríguez et al. (2011) el método de Penman-Monteith es ideal para calcular la evapotranspiración (ET_0) en una plantación de nogal debido a su precisión y robustez, al considerar factores climáticos como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento. Una estimación precisa de la ET_0 es crucial para la gestión adecuada del riego en los nogales, permitiendo ajustar las necesidades de agua según las condiciones ambientales y optimizando así el crecimiento y la productividad de los árboles. Validado y recomendado por la FAO y otros organismos internacionales, este método se destaca como una herramienta confiable para asegurar que los nogales reciban la cantidad de agua necesaria para su óptimo desarrollo.

2.2.5. Metodología de la medición de la Evapotranspiración

Para la medición de las distintas variables que se considera en el cálculo de la evapotranspiración se presenta en la Tabla 3 los métodos por los cuales se llegan a extraer y obtener los datos útiles a considerar:

Tabla 3.*Métodos de medición de variables de la Evapotranspiración*

Variable	Método
Temperatura del aire	Sensores de temperatura colocados en entorno a evaluar.
Humedad relativa	Sensores de humedad colocados tanto dentro de la tierra como en el entorno a evaluar.
Radiación Solar	Piranómetros y radiómetros para medir la incidencia de radiación solar en el cultivo.
Velocidad del viento	Anemómetros colocados cerca al entorno a evaluar.
Presión atmosférica	Barómetros o revisión en la web de acuerdo con la altura donde se encuentra la plantación.
Temperatura del suelo	Sensores de temperatura del suelo insertados en profundidad adecuada.
Altitud	Datos geográficos y topográficos del área de estudio usando GPS y mapas topográficos.
Precipitación	Pluviómetros

Nota: Elaboración Propia.

2.3. Internet de las Cosas

La UIT (2012) refiere al Internet de las Cosas (IoT) como una sociedad formada por "cosas" inteligentes que pueden comunicarse entre sí, ya sea directamente o a través de una red. El IoT materializa la idea de que todo puede estar conectado en cualquier lugar y en cualquier momento. Este concepto se aplica en diversos sectores, como la ciber-salud, el ciber-gobierno, la industria automotriz, los sistemas de información geográfica, la teledetección, las redes domésticas (domótica), el comercio electrónico y la mitigación de los efectos del cambio climático.

El IoT incluye un conjunto de tecnologías de red, tanto alámbricas como inalámbricas, que permiten el intercambio de información. Esta evolución del IoT ha permitido el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, como dispositivos de hardware, capacidades de

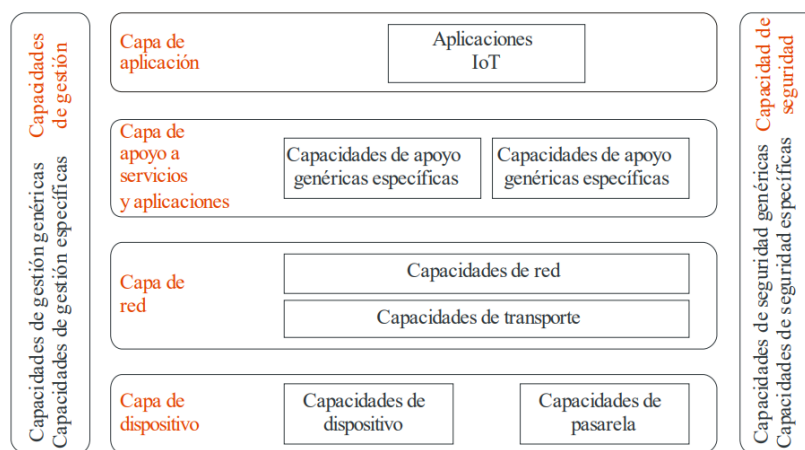
conectividad y almacenamiento de datos en plataformas en la nube, llevando a cabo procesos de manera automática e inteligente y con un bajo consumo de energía.

2.3.1. Modelo de Referencia IoT

Como se muestra en a Figura 6, el modelo de referencia IoT cuenta con 4 capas cubiertas por capacidades de gestión y seguridad:

Figura 6.

Modelo de Referencia IoT por capas



Nota: Tomado de Recomendación UIT-T Y.2060. Descripción general de Internet de los objetos (UIT, 2012a).

A continuación, se detalla las capas que conforman el modelo de referencia IoT:

2.3.1.1. Capa de Dispositivo

La capa de dispositivo en el Internet de las Cosas (IoT) se clasifica en dos tipos de capacidades: las de dispositivo y las de pasarela. Las capacidades de dispositivo incluyen la interacción directa e indirecta con la red de comunicación, la formación de redes ad-hoc para aumentar la capacidad y velocidad de despliegue, y la habilidad de alternar entre modos de reposo y activo para ahorrar energía. Estas capacidades permiten a los dispositivos recabar y cargar información, así como recibir instrucciones, directamente o mediante pasarelas, según las necesidades del entorno (Peña & Suquillo, 2016).

Las capacidades de pasarela soportan múltiples interfaces, permitiendo la conexión de dispositivos a través de diversas tecnologías alámbricas e inalámbricas como CAN, ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi, y la comunicación en la capa de red mediante tecnologías como PSTN, 2G, 3G, LTE, Ethernet o DSL. Además, las pasarelas facilitan la conversión de protocolos, necesaria cuando diferentes protocolos son utilizados en la comunicación entre la capa de dispositivo y la de red, o entre dispositivos que emplean distintas tecnologías, garantizando así la interoperabilidad en el ecosistema IoT (Peña & Suquillo, 2016).

2.3.1.2. Capa de Red

Según Buitrón (2022) las capacidades de red son responsables de gestionar y controlar la conectividad, incluyendo funciones cruciales como el control de acceso, la gestión de recursos de transporte, la movilidad y los servicios de autenticación, autorización y contabilidad. Estas funciones aseguran que los dispositivos y usuarios estén correctamente autenticados y autorizados, y que el uso de los recursos sea eficiente y seguro.

Por otro lado, las capacidades de transporte se enfocan en proporcionar la conectividad necesaria para el transporte de datos e información específica de servicios y aplicaciones de IoT, así como la información de control y gestión relacionada con IoT. Esto incluye la transmisión de datos desde sensores y dispositivos IoT hasta las plataformas de gestión, permitiendo una comunicación fluida y efectiva en el ecosistema de IoT.

2.3.1.3. Capa de apoyo de servicios y aplicaciones

La capa de soporte de servicios y aplicaciones en el entorno IoT se divide en dos grupos de capacidades fundamentales: las capacidades de soporte genéricas y las capacidades de soporte específicas. Las capacidades de soporte genéricas incluyen funciones comunes que pueden ser utilizadas por diversas aplicaciones IoT, como el procesamiento y almacenamiento de datos. Estas capacidades son versátiles y también pueden servir como base para desarrollar otras capacidades más especializadas (Peña & Suquillo, 2016).

Por otro lado, las capacidades de soporte específicas están diseñadas para satisfacer las necesidades particulares de diferentes aplicaciones IoT. Estas pueden consistir en diversos conjuntos de capacidades que ofrecen funciones de apoyo específicas para cada aplicación, asegurando así que cada una opere de manera eficiente y efectiva. En conjunto, estas capas son esenciales para proporcionar una infraestructura robusta y flexible que facilite el desarrollo y funcionamiento de aplicaciones IoT, optimizando el uso de recursos y mejorando la eficiencia operativa en diversos contextos (Peña & Suquillo Chuquimarca, 2016).

2.3.1.4. Capa Aplicación

La capa de aplicación es la capa superior del modelo de referencia IoT y se enfoca en las aplicaciones IoT específicas. Esta capa abarca las diversas aplicaciones que utilizan los datos procesados para proporcionar servicios y soluciones en diferentes sectores. Ejemplos de aplicaciones IoT incluyen el monitoreo de la salud, la gestión de energía, la automatización del hogar, la agricultura inteligente, y las ciudades inteligentes. Esta capa es donde se materializa el valor real del IoT, mejorando la eficiencia, la productividad, y la calidad de vida de los usuarios (Miranda Vargas, 2022).

2.3.1.5. Capacidades de Gestión

Las capacidades de gestión IoT se dividen en dos categorías: genéricas y específicas. Las capacidades genéricas incluyen la gestión de dispositivos, que abarca tareas como la activación y desactivación de dispositivos remotos, el diagnóstico, la actualización de firmware y software, y la gestión del estado de funcionamiento de los dispositivos. También incluyen la gestión de la topología de la red local y la gestión del tráfico y la congestión, lo cual es crucial para detectar condiciones de saturación en la red y aplicar reservas de recursos para flujos de datos críticos. Por otro lado, las capacidades de gestión específicas se adaptan a los requisitos particulares de cada aplicación, como los sistemas de control de la línea de transmisión en redes eléctricas inteligentes (UIT, 2012a).

2.3.1.6. Capacidades de Seguridad

Las capacidades de seguridad también se dividen en genéricas y específicas. Las capacidades de seguridad genéricas son independientes de la aplicación y se implementan en diferentes capas. En la capa de aplicación, incluyen autorización, autenticación, confidencialidad de datos, protección de integridad, protección de la privacidad, auditorías de seguridad y antivirus. En la capa de red, se ocupan de la autorización, autenticación, confidencialidad de datos de señalización y uso, y protección de la integridad de la señalización. En la capa de dispositivo, incluyen autenticación, autorización, validación de la integridad del dispositivo, control de acceso, confidencialidad de datos y protección de integridad. Las capacidades de seguridad específicas se diseñan para satisfacer las necesidades de aplicaciones particulares, como los requisitos de seguridad para los pagos móviles (UIT, 2012a).

2.4. Redes de Sensores Inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) representan una tecnología clave en el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental y agrícola. Estas redes están formadas por nodos autónomos interconectados que recopilan, procesan y transmiten datos de variables físicas del entorno, como temperatura, humedad del suelo, radiación solar o velocidad del viento (Cruz et al., 2021).

Cada nodo de una WSN suele estar compuesto por uno o varios sensores, una unidad de procesamiento, un módulo de comunicación y una fuente de alimentación, generalmente basada en baterías o paneles solares. Esta arquitectura permite que las WSN funcionen de forma descentralizada, siendo capaces de operar durante largos periodos sin intervención humana (Villarraga & Rodríguez, 2019).

2.4.1. Estructura y Funcionamiento

Una WSN está compuesta por múltiples nodos distribuidos espacialmente, diseñados para captar y transmitir datos del entorno físico. Estas redes se caracterizan por su capacidad de operar de manera autónoma, con bajo consumo energético y adaptabilidad a diferentes tipos de terreno, lo que las hace especialmente útiles en entornos agrícolas, donde la cobertura es amplia y la energía suele ser limitada (Villarraga & Rodríguez, 2019).

2.4.1.1. Elementos principales de una WSN

Una WSN orientada al monitoreo agrícola incluye los siguientes componentes clave:

- **Nodos sensores (o nodos terminales):** Son los dispositivos encargados de medir las variables ambientales como temperatura, humedad del suelo, radiación solar, velocidad del viento, entre otras. Estos nodos pueden estar conformados por microcontroladores (como Arduino o ESP32), módulos de comunicación (LoRa, ZigBee, etc.) y sensores específicos. Su función es captar datos, procesarlos localmente si es necesario, y transmitirlos al nodo central (Cruz et al., 2021).
- **Nodo coordinador o *gateway*:** Es el dispositivo encargado de recibir la información de los nodos sensores. Este nodo tiene mayor capacidad de procesamiento y suele estar conectado a una red de mayor cobertura (como Wi-Fi, red celular o Ethernet) para reenviar los datos hacia un servidor o la nube. El gateway puede estar constituido, por ejemplo, por una Raspberry Pi, con capacidades de almacenamiento y conexión externa (Solís et al., 2021).
- **Servidor, plataforma web o sistema en la nube:** Recibe, almacena y procesa la información censada. En esta capa se realizan análisis de los datos, se generan reportes y se ofrecen visualizaciones en tiempo real mediante dashboards, aplicaciones móviles o software de inteligencia de negocios (L. González & Pérez,

2022). Además, se pueden configurar alertas y sistemas de decisión basados en umbrales.

2.4.2. Jerarquía y topologías de red

Las WSN pueden configurarse en diferentes topologías según las necesidades de cobertura, redundancia o facilidad de implementación. En la Figura 7 se indica como se desarrollan las distintas topologías de red:

2.4.2.1. Topología en estrella:

Cada nodo sensor se comunica directamente con el *gateway*. Es simple, pero no escalable en grandes áreas.

2.4.2.2. Topología en árbol o jerárquica

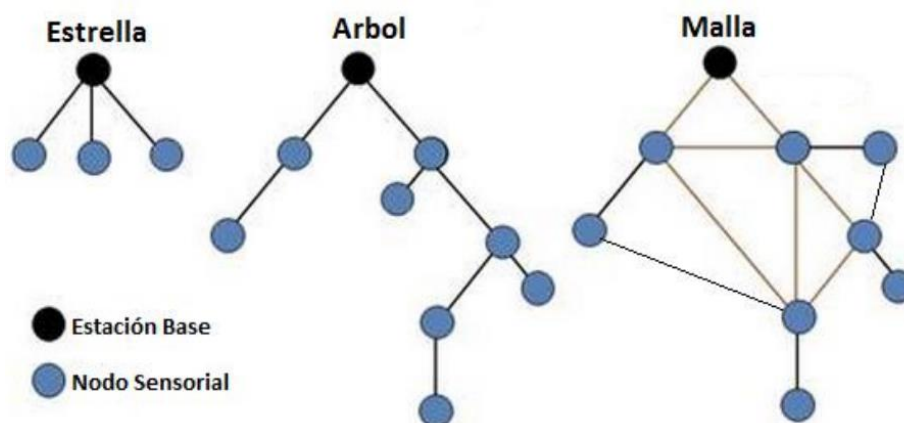
Los nodos se organizan en niveles, permitiendo mayor cobertura y mejor distribución de la carga de comunicación.

2.4.2.3. Topología en malla (mesh):

Cada nodo puede comunicarse con múltiples nodos vecinos. Esta configuración mejora la resiliencia ante fallos, aunque puede aumentar el consumo energético (Cárdenas et al., 2020).

Figura 7.

Tipos de Topologías de Red



Nota: Tomado de *Análisis de rendimiento de protocolos de publicación/suscripción en comunicación con una red de sensores inalámbricos Zigbee* (Hervas, 2018).

La elección de topología depende de factores como la distancia entre sensores, la orografía (geografía física de las montañas), los obstáculos naturales (vegetación, pendientes), la frecuencia de transmisión de datos, y el tipo de tecnología de comunicación utilizada.

2.4.3. Comparativa de tecnologías inalámbricas aplicadas a redes WSN

La elección del protocolo de comunicación inalámbrica en una red de sensores agrícolas depende de múltiples factores como la cobertura geográfica del cultivo, la disponibilidad energética, el volumen de datos a transmitir y la frecuencia de actualización requerida. En la Tabla 4, se indica la comparativa de las principales tecnologías utilizadas en redes de sensores inalámbricos para aplicaciones agrícolas:

Tabla 4.*Tecnologías de comunicación inalámbrica para redes WSN*

Tecnología	Alcance	Frecuencia	Velocidad de transmisión
ZigBee(IEEE 802.15.4)	10–100 metros	2.4 GHz	20–250 kbps
Wi-Fi(IEEE 802.11n/g)	50–150 metros	2.4 / 5 GHz	11–600 Mbps
LoRa	2–15 kilómetros	433 / 868 / 915 MHz	0.3–50 kbps
LoRaWAN	2–15 kilómetros	868 MHz (EU), 915 MHz (US)	0.3–50 kbps
NB-IoT	Hasta 35 km	700–900 MHz	26–250 kbps
Sigfox	Hasta 50 km	868 MHz (EU)	< 100 bps
Bluetooth Low Energy	10–50 metros	2.4 GHz	125 kbps–2 Mbps

Nota: Elaboración propia con base en *Monitoreo ambiental con WSN en cultivos agrícolas del altiplano mexicano* (Cruz et al., 2021), *Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas aplicadas a la agricultura inteligente* (Fernández et al., 2018), *Sistemas de monitoreo agrícola basados en redes LPWAN: un enfoque práctico* (Solís et al., 2021) y *Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de cultivos en zonas rurales* (Villarraga & Rodríguez, 2019).

2.4.4. Funcionamiento usual de un ciclo de monitoreo

Para cualquier aplicación que se le otorgue y planifique un despliegue de una red WSN suele seguir el siguiente ciclo:

1. Censado: Los sensores capturan variables del entorno cada cierto intervalo de tiempo.
2. Procesamiento local (opcional): En algunos sistemas, los nodos pueden realizar cálculos preliminares, como promedios o detección de valores anómalos.
3. Transmisión: Los datos son enviados al gateway mediante enlaces inalámbricos.
4. Enrutamiento (si aplica): En redes en malla, los datos pueden pasar por varios nodos hasta llegar al destino.
5. Recolección y almacenamiento: El gateway almacena temporalmente los datos o los reenvía inmediatamente a un servidor.
6. Análisis y visualización: En la capa superior, los datos son representados gráficamente y utilizados para la toma de decisiones, como activar sistemas de riego (Vásquez & Rivera, 2022).

2.5. Dispositivos de medición y adquisición de datos

Los sistemas de monitoreo ambiental y climático utilizados en agricultura de precisión requieren de dispositivos capaces de detectar, procesar y registrar variables del entorno con precisión. Estos sistemas están conformados por diversos componentes electrónicos y sensores especializados que, en conjunto, permiten obtener información relevante sobre las condiciones que afectan el crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos (Morales et al., 2021).

Generalmente, un sistema de adquisición de datos en aplicaciones agroclimáticas comprende tres tipos de elementos: sensores, unidades de adquisición y procesamiento, y módulos de comunicación. La correcta integración de estos dispositivos es esencial para garantizar la calidad de los datos, la continuidad operativa del sistema y la utilidad práctica de la información recolectada.

2.5.1. Sensores ambientales

Los sensores son los encargados de captar variables físicas del entorno, transformándolas en señales eléctricas que pueden ser procesadas por un microcontrolador o computadora. En el contexto agrícola, las variables más comúnmente monitoreadas incluyen:

- Temperatura del aire y del suelo
- Humedad relativa y humedad del suelo
- Radiación solar (irradiancia global)
- Velocidad y dirección del viento
- Presión atmosférica
- Precipitación

La selección del tipo de sensor depende de factores como la exactitud requerida, el entorno de instalación, el rango de medición, y la compatibilidad eléctrica con la unidad de adquisición (Sánchez & Castillo, 2020). Es importante tomar en cuenta que hay sensores que entregan lecturas análogas o digitales, que según el código de programación que se utilice para interpretarlos, traducirlos y gestionarlos se debe evaluar si el microcontrolador o microcomputador a utilizar trabaja con estos dos tipos de datos. Por ejemplo, el microcontrolador Arduino Uno tiene pines de entradas y salidas análogas y digitales que facilitan el proceso. En caso de no tener pines entrada o salida análogas se requiere buscar un Conversor Análogo-Digital (ADC) que sea apto en compatibilidad electrónico para hacer las conversiones según el sensor y manejar el tipo de dato digital ideal para la placa que procese la información adecuadamente.

2.5.2. Módulos de adquisición de datos

Los módulos de adquisición de datos actúan como puente entre los sensores y el sistema de almacenamiento o procesamiento. Estos pueden estar integrados en una plataforma computacional (como microcontroladores o microcomputadoras), y se encargan de convertir

señales analógicas en digitales, aplicar filtros, sincronizar mediciones, y almacenar los datos. En algunos casos, pueden incluir capacidades para procesar los datos localmente y tomar decisiones en el borde (*edge computing*) (Cordero et al., 2021).

2.5.3. Unidades de procesamiento

Las unidades de procesamiento pueden variar desde microcontroladores de bajo consumo energético hasta microcomputadoras con mayor capacidad de cálculo. Estas unidades permiten ejecutar rutinas de programación para interpretar datos censados, realizar cálculos, enviar información a un servidor, plataforma web o dispositivo móvil y activar salidas (por ejemplo, encender sistemas de riego) en función de umbrales predefinidos.

En sistemas modernos, también se recurre a plataformas con sistemas operativos ligeros que permiten la conectividad con redes inalámbricas y servicios en la nube, facilitando el acceso remoto a los datos censados (L. Gómez et al., 2022).

La elección de una unidad de procesamiento adecuada (sea un microcontrolador de bajo consumo o una microcomputadora con mayor potencia de cálculo) depende de factores como la complejidad de las tareas, la necesidad de conectividad integrada y el presupuesto. La Tabla 5, resume algunas de las plataformas más comerciales y utilizadas en proyectos de monitoreo ambiental y agricultura de precisión, indicando desde placas muy básicas hasta equipos capaces de ejecutar sistemas operativos completos:

Tabla 5.

Microcontroladores y microcomputadoras comerciales relevantes para sistemas de monitoreo

Dispositivo	Tipo	Procesador / MCU	Memoria (RAM / Flash)	Conectividad integrada	Detalle
Arduino Uno (ATmega328P)	Microcontrolador	AVR 8-bit @ 16 MHz	2 KB / 32 KB	(requiere módulos externos)	Prototipado educativo; muy bajo consumo.
ESP32-WROOM-32 D	Microcontrolador	Xtensa LX6 dual-core @ 240 MHz	520 KB / 4 MB Flash	Wi-Fi, BLE	IoT, nodos Wi-Fi autónomos.
STM32F103C8 (“Blue Pill”)	Microcontrolador	ARM Cortex-M3 @ 72 MHz	20 KB / 64 KB Flash	(UART, SPI, I ² C)	Bajo costo, amplia comunidad.
Teensy 4.0	Microcontrolador	ARM Cortex-M7 @ 600 MHz	1024 KB / 2048 KB Flash	(USB, SPI, I ² C, CAN)	Procesamiento de señales en tiempo real.
Raspberry Pi Pico W	Microcontrolador	RP2040 dual-core M0+ @ 133 MHz	264 KB / 2 MB Flash	Wi-Fi (2.4 GHz)	Nodificación sencilla con Wi-Fi.
Raspberry Pi Zero 2 W	Micro computadora	Quad Cortex-A53 @ 1 GHz	512 MB LPDDR2	Wi-Fi, BLE, GPIO	Nodo central ligero; OS Linux.
Raspberry Pi 4 Model B	Micro computadora	Quad Cortex-A72 @ 1.5 GHz	2–8 GB LPDDR4	Wi-Fi, BLE, Ethernet GbE, USB 3.0	Pasarelas, servidor local de datos.
BeagleBone Black	Micro computadora	ARM Cortex-A8 @ 1 GHz	512 MB DDR3	Ethernet, USB, GPIO	Tiempo real con PRU; robustez industrial
NVIDIA Jetson Nano	Micro computadora	Quad Cortex-A57 + GPU 128 CUDA cores	4 GB LPDDR4	Wi-Fi* (USB), GigE	Visión artificial en campo (*requiere dongle USB).
Orange Pi Zero 2	Micro computadora	Quad Cortex-A53 @ 1.5 GHz	1 GB DDR3	Wi-Fi, GigE, BLE	Alternativa económica para gateways.

Nota: Elaboración propia con base en *Arduino Uno Rev3: Datasheet* (Arduino, 2023),

ESP32-WROOM-32 Data Sheet: Version 4.1 (Espressif Systems, 2022), *Raspberry Pi Zero 2*

W Product Brief (Raspberry Pi Foundation, 2021b), *STM32F103x8/xB Data Sheet*

(STMicroelectronics, 2022), *Teensy 4.0 Technical Specifications* (PJRC, 2023), *BeagleBone Black System Reference Manual* (BeagleBoard, 2020), *Jetson Nano Developer Kit User Guide (Rev. 2)* (NVIDIA, 2021) y *Orange Pi Zero 2 Hardware Specification* (Orange Pi, 2022).

2.6. Inteligencia de Negocio

La Inteligencia de Negocios (BI: Business Intelligence) es una herramienta que permite a las organizaciones respaldar la toma de decisiones mediante la recopilación, almacenamiento y análisis de datos de diversas fuentes, garantizando información precisa y oportuna. Utiliza elementos clave como data warehouses, OLAP, Balance Scorecard y minería de datos para generar conocimientos necesarios que facilitan la elección de alternativas estratégicas y aseguran el éxito empresarial. BI integra datos, los organiza para análisis detallados, los presenta mediante visualizaciones interactivas y reportes, y así, optimiza recursos, mejora operaciones y permite decisiones informadas y competitivas (A. Gómez & Bautista, 2010).

En la Tabla 6, se indica las plataformas de BI que destacan por sus características y ventajas únicas y que se puede adaptar a las necesidades de proyectos de resultados del presente proyecto:

Tabla 6.*Principales plataformas de Business Intelligents (BI)*

Tipo	Descripción	Ventaja Diferenciadora
Microsoft Power BI	Plataforma de BI que ofrece visualizaciones interactivas y capacidades de inteligencia empresarial.	Integración nativa con productos de Microsoft y facilidad de uso.
Tableau	Herramienta de visualización de datos que permite crear gráficos y dashboards interactivos.	Amplia comunidad de usuarios y capacidad de manejar grandes volúmenes de datos con rapidez.
Qlik Sense	Plataforma de análisis de datos que proporciona visualizaciones personalizables y exploración de datos.	Motor de asociación único que permite una exploración intuitiva de datos.
SAP BusinessObjects	Conjunto de herramientas de BI que permite reportes, análisis y visualizaciones de datos.	Solución robusta para grandes organizaciones con necesidades complejas de análisis de datos.
Oracle BI	Suite de herramientas de BI que ofrece informes, análisis y dashboards interactivos.	Integración profunda con otros productos de Oracle y capacidades avanzadas de análisis.
SAS Business Intelligence	Conjunto de soluciones de BI que proporciona análisis avanzado y visualización de datos.	Fuerte enfoque en análisis estadístico y capacidades predictivas avanzadas.

Nota: Elaboración propia con base en *COMPARATIVA: examinamos 11 plataformas*

de business intelligence (BI) (De Miguel, 2023).

3. CAPITULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Introducción

El presente capítulo aborda el diseño, construcción e implementación del sistema de monitoreo ambiental desarrollado para la plantación de nogales de la Granja Experimental Yuyucocha. Este capítulo da cumplimiento al tercer objetivo específico del proyecto, el cual se enfoca en la construcción de un prototipo funcional capaz de adquirir variables agroclimáticas, transmitir la información de forma inalámbrica en tiempo real y almacenarla en una base de datos para su posterior visualización y análisis.

A partir de los conceptos y requerimientos definidos en los capítulos anteriores, se describe la metodología de desarrollo adoptada, así como los criterios técnicos empleados para la selección de los componentes de hardware y software que conforman el sistema. El prototipo implementado se basa en una arquitectura IoT soportada por una red de sensores inalámbricos, integrada por nodos distribuidos.

Asimismo, se detalla la arquitectura general del sistema, el diseño de los subsistemas de adquisición de datos, comunicación inalámbrica, almacenamiento y procesamiento de la información, así como la implementación del código y la base de datos correspondiente. Finalmente, se presentan las consideraciones para el despliegue físico del sistema en campo y las estrategias de prueba y validación preliminar, las cuales permiten verificar el correcto funcionamiento del prototipo antes del análisis de resultados que se desarrolla en el capítulo siguiente.

3.2. Metodología de Desarrollo

Para el desarrollo de este proyecto se optó por aplicar el modelo de ciclo de vida en V, una metodología estructurada que facilita la relación directa entre las etapas de diseño del sistema y sus respectivas fases de validación y prueba. Este enfoque permite una mayor

trazabilidad entre los requisitos establecidos al inicio y los resultados obtenidos al finalizar el proceso de implementación (García-Mendoza et al., 2021).

La Figura 8, muestra como es la estructura del desarrollo de la Metodología en V:

Figura 8.

Modelo de Desarrollo Metodología en V



Nota: Elaboración Propia.

El modelo en V se divide en dos bloques principales: el lado izquierdo contempla las actividades de análisis y diseño, mientras que el lado derecho se orienta a la validación progresiva de esas etapas mediante pruebas específicas. En el vértice inferior se encuentra la fase de codificación, que conecta ambos extremos. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en proyectos de desarrollo de sistemas embebidos, especialmente en contextos agrícolas e industriales, debido a su capacidad de reducir riesgos y aumentar la calidad final del producto (C. Rodríguez & Ríos, 2018).

3.2.1. Estudio de Requisitos

En esta etapa inicial, se definen los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, considerando las variables clave que el sistema de monitoreo debe medir, como la temperatura y la humedad en los nogales. Además, se diseñan las pruebas de aceptación para

garantizar que los objetivos planteados sean verificables al finalizar el proyecto (C. Rodríguez & Ríos, 2018).

3.2.2. *Diseño del Sistema*

Con los requisitos establecidos, se procede a la definición de la estructura general del sistema. Esto incluye el diseño conceptual de los componentes principales, como nodos sensores, nodos controladores y la red de comunicación. De manera paralela, se elaboran las pruebas del sistema, asegurando que los subsistemas sean evaluados en su conjunto para validar la integración de las funciones.

3.2.3. *Diseño de Arquitectura*

En esta fase se define la organización detallada del sistema, abarcando la disposición de hardware y software. Se especifican las interacciones entre módulos y la estructura de comunicación dentro de la red de sensores. Asimismo, se diseñan las pruebas de integración, las cuales permiten evaluar la interacción entre los distintos módulos del sistema.

3.2.4. *Diseño Modular*

Aquí se desarrolla un esquema detallado para cada componente del sistema, dividiendo las funcionalidades en módulos específicos. Esto incluye el diseño de nodos sensores individuales, el software asociado a la recolección de datos y las interfaces de comunicación. Además, se planifican las pruebas unitarias para garantizar que cada módulo funcione de forma independiente y cumpla con sus especificaciones.

3.2.5. *Programación*

En esta etapa se lleva a cabo la implementación técnica del sistema. Los módulos diseñados previamente son desarrollados y configurados, incluyendo la programación de los microcontroladores, sensores y plataformas de gestión de datos. Esta fase es fundamental para integrar las funcionalidades teóricas en un sistema operativo.

3.2.6. Pruebas Unitarias

Se evalúa el correcto funcionamiento de cada módulo individual para verificar que cumplen con las especificaciones establecidas. Esto incluye probar sensores, microcontroladores y componentes del software de manera independiente para identificar y corregir errores antes de proceder con la integración.

3.2.7. Pruebas de Integración

En esta etapa, los módulos individuales se ensamblan y se verifican como un conjunto. Las pruebas de integración garantizan que las interacciones entre los nodos sensores, la red de comunicación y los nodos controladores funcionen de forma coherente y sin conflictos.

3.2.8. Pruebas de Sistema

Se evalúa el sistema en su totalidad, simulando condiciones reales para asegurar que cumple con los objetivos definidos. Esta fase incluye la validación de la precisión de los datos recolectados, la estabilidad de la red y la funcionalidad general del sistema bajo diferentes escenarios operativos.

3.2.9. Pruebas de Aceptación

El sistema completo se somete a las pruebas de aceptación diseñadas durante la etapa de requisitos. Esto asegura que el sistema cumple con los objetivos del proyecto y satisface las expectativas del usuario. Las pruebas se realizan en el entorno operativo real para validar el desempeño del sistema en condiciones prácticas.

El uso del modelo en V garantiza una transición ordenada entre etapas, permite una validación temprana de errores y asegura que el sistema resultante responda fielmente a las necesidades identificadas al inicio del proyecto (Vargas & Toledo, 2019).

3.3. Análisis del entorno y requisitos del sistema

El diseño e implementación del sistema de monitoreo ambiental requiere un análisis previo del entorno de operación y de los requisitos que el sistema debe cumplir para garantizar su correcto funcionamiento. En esta sección se describen las condiciones físicas y operativas del lugar donde se implementa el prototipo, así como los requerimientos funcionales y no funcionales que guían el desarrollo del sistema desde el punto de vista técnico.

El análisis del entorno permite identificar factores ambientales, geográficos y de infraestructura que influyen directamente en la selección de los componentes, en la arquitectura de comunicación y en las estrategias de despliegue del sistema. De igual manera, la definición de los requerimientos del sistema establece de forma clara las funcionalidades esperadas, las restricciones de desempeño y las condiciones mínimas de operación que debe cumplir el prototipo desarrollado.

Este análisis constituye una etapa clave dentro del Modelo en V aplicado al proyecto, ya que los requerimientos definidos en esta sección sirven como base para las fases posteriores de diseño, implementación y validación del sistema de monitoreo ambiental.

3.3.1. Entorno de la Granja Experimental Yuyucocha

El sistema de monitoreo ambiental desarrollado en el presente proyecto se plantea para su implementación en la Granja Experimental Yuyucocha, perteneciente a la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la provincia de Imbabura, Ibarra Ecuador. Este espacio se destina a actividades académicas, de investigación y experimentación agrícola, lo que lo convierte en un entorno adecuado para el desarrollo y validación de soluciones tecnológicas orientadas al monitoreo de variables agroclimáticas.

Figura 9.

Ubicación Granja Experimental Yuyucocha-Ibarra Ecuador



Nota: Imagen capturada desde Google Maps.

La plantación de nogales considerada para el desarrollo del prototipo se encuentra en un entorno semiabierto, caracterizado por la exposición directa a condiciones climáticas variables, tales como cambios de temperatura, radiación solar, humedad ambiental y presencia de viento. Estas condiciones influyen tanto en el comportamiento fisiológico del cultivo como en los requisitos técnicos del sistema de monitoreo ambiental propuesto.

Figura 10.

Entorno-plantación de Nogales en Granja Experimental Yuyucocha



Nota: Fotografía tomada por el autor.

El entorno presenta limitaciones propias de una zona agrícola, como la ausencia de infraestructura de red cableada en campo y la necesidad de utilizar enlaces inalámbricos para la transmisión de datos. No obstante, se dispone de conectividad Wi-Fi en puntos estratégicos de la granja, lo cual se considera para establecer la comunicación entre los nodos del sistema y el acceso a servicios en la nube para el almacenamiento y procesamiento de la información.

Como adicional, las condiciones del terreno y la disposición espacial de la plantación influyen en la planificación de la ubicación física de los nodos sensores, considerando aspectos como el alcance de comunicación, la protección de los equipos frente a la intemperie y la facilidad de mantenimiento. Este entorno real de aplicación permite definir criterios técnicos que guían el diseño del sistema bajo condiciones similares a las que se presentarían en una implementación agrícola a mayor escala.

3.3.2. Estudio de Requisitos

El estudio de requisitos representa una de las fases más críticas en el desarrollo de sistemas tecnológicos, ya que permite establecer desde el inicio qué se espera del sistema, cómo debe comportarse ante ciertas condiciones y cuáles son sus limitaciones. En proyectos que combinan sensores, transmisión de datos y procesamiento en tiempo real, como los sistemas de monitoreo ambiental, esta etapa resulta aún más relevante, debido a la variedad de variables y restricciones del entorno donde se desplegará la solución (Sommerville, 2016).

A través de la ingeniería de requisitos se busca reducir la ambigüedad y establecer una visión clara del sistema antes de comenzar el diseño y la implementación. Esto permite tomar decisiones informadas en etapas posteriores y minimizar errores costosos o retrabajos. Además, la correcta identificación de requisitos facilita la validación del sistema, al brindar una base objetiva para verificar si se cumplen los objetivos establecidos (Pressman & Maxim, 2020a).

En este proyecto, los requisitos se han clasificado en dos categorías principales: requisitos funcionales, que describen las operaciones que el sistema debe ejecutar, y requisitos no funcionales, que corresponden a características de calidad como eficiencia energética, confiabilidad, escalabilidad, entre otras. Esta división permite abordar tanto el comportamiento observable como las propiedades internas del sistema (ISO/IEC/IEEE, 2018).

3.3.2.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales son fundamentales para definir qué debe hacer el sistema de monitoreo en condiciones reales de operación. En este proyecto, se busca implementar un sistema capaz de capturar información relevante del entorno agrícola para el cálculo de la evapotranspiración, por lo que se establecieron en la siguiente tabla las siguientes funcionalidades principales:

Tabla 7.

Requisitos funcionales para el sistema de monitoreo

Medición de variables ambientales	El sistema debe ser capaz de censar variables como temperatura, humedad relativa del aire, humedad del suelo, radiación solar y velocidad del viento. Estas variables son esenciales para el análisis agroclimático y la posterior estimación de la evapotranspiración de referencia según el modelo FAO Penman-Monteith
Adquisición y transmisión de datos en tiempo real	Los sensores deben estar conectados a una unidad de procesamiento que recoja los datos y los envíe de manera inalámbrica hacia una estación coordinadora. Esta transmisión debe realizarse de forma periódica y confiable para garantizar la continuidad del monitoreo
Almacenamiento estructurado de información	Una vez recibidos, los datos deben ser almacenados en una base de datos estructurada. Esta información permitirá su consulta histórica y posterior análisis por parte del usuario o de sistemas automatizados de procesamiento.
Visualización de datos	El sistema debe disponer de una interfaz gráfica que permita al usuario observar en tiempo real el comportamiento de las variables medidas. Esta visualización debe ser accesible desde dispositivos conectados a la red local o internet, facilitando la supervisión remota.
Compatibilidad con procesos de análisis posteriores	La estructura de los datos almacenados debe ser compatible con algoritmos o modelos que permitan el cálculo automatizado de la evapotranspiración, como el modelo FAO Penman-Monteith, frecuentemente utilizado en este tipo de aplicaciones.

Nota: Elaboración propia con base en *Diseño de un sistema de monitoreo ambiental*

IoT para la gestión hídrica en cultivos andinos (Calderón et al., 2023), Sistemas de sensores

para monitoreo de variables agroclimáticas en tiempo real (Orellana et al., 2021) y *Aplicación del modelo FAO Penman-Monteith en sistemas automatizados de riego con monitoreo remoto* (A. Gómez et al., 2019).

Con estos requisitos funcionales, nos aseguramos de que el sistema responda a las necesidades reales del entorno agrícola en el que será implementado. De misa forma, estas funciones sirven de guía para la selección posterior del hardware, protocolos de comunicación y herramientas de desarrollo de software.

3.3.3. Requisitos no funcionales

Los requisitos no funcionales establecen las características de calidad que debe cumplir el sistema para garantizar su correcto funcionamiento en entornos reales. Aunque no definen directamente las funciones operativas, estos requisitos condicionan aspectos esenciales como la estabilidad, el consumo energético, la escalabilidad y la usabilidad del sistema. En el contexto agrícola, donde el sistema puede estar expuesto a condiciones ambientales adversas, estos criterios adquieren especial relevancia:

Tabla 8.*Requisitos no Funcionales para el sistema de Monitoreo*

Eficiencia energética	La integración con paneles solares o baterías de larga duración es una estrategia común en este tipo de aplicaciones como solución para no depender de un solo tipo de suministro energético.
Robustez física y tolerancia al ambiente	Esto implica que los componentes estén encapsulados y protegidos frente a polvo, humedad, radiación solar y variaciones térmicas. La resistencia a estas condiciones garantiza que el sistema se mantenga operativo sin necesidad de mantenimiento constante.
Escalabilidad del sistema	Permite añadir nuevos nodos sensores sin comprometer la funcionalidad del sistema general. Esta cualidad es esencial para futuros escenarios de ampliación del monitoreo a nuevas áreas o cultivos
Fiabilidad en la transmisión de datos	La pérdida de paquetes o la interrupción de la comunicación pueden afectar directamente la calidad del análisis de las variables ambientales. Por tanto, es necesario implementar protocolos de comunicación que aseguren la entrega y validación de datos
Facilidad de mantenimiento	De forma que los módulos puedan ser sustituidos o reconfigurados sin necesidad de herramientas especializadas o conocimientos avanzados. Esto reduce tiempos de inactividad y mejora la sostenibilidad del sistema
Usabilidad y accesibilidad	Este debe contemplar una interfaz gráfica que permita a usuarios finales interpretar los datos recolectados y tomar decisiones. Esto incluye acceso multiplataforma desde computadoras o dispositivos móviles con una experiencia de usuario clara e intuitiva.

Nota: Elaboración propia con base en *Sistemas de monitoreo ambiental con enfoque en eficiencia energética en IoT* (Martínez & Romero, 2021), *Sistemas IoT robustos para monitoreo ambiental en campo abierto* (Vega et al., 2019), *Diseño escalable de sistemas IoT para monitoreo agrícola en zonas rurales* (M. Gómez & Salinas, 2022), *Redes de sensores inalámbricos y fiabilidad en la transmisión de datos en ambientes agrícola* (Paredes et al., 2020), *Mantenimiento y actualización remota en sistemas embebidos aplicados al agro* (Salcedo & Castillo, 2021) y *Diseño de interfaces accesibles en plataformas de monitoreo ambiental* (Ríos & Montenegro, 2023).

3.4. Selección de Hardware y Software

La elección de los componentes físicos y lógicos es importante para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo propuesto. Esta selección se fundamenta en criterios como el entorno de despliegue, los requerimientos funcionales definidos, el bajo

consumo energético, la disponibilidad de componentes en el mercado, la compatibilidad entre dispositivos, programación y mantenimiento.

En hardware, se opta por una arquitectura basada en la placa Raspberry Pi Zero 2, con sensores específicos para variables ambientales y módulos que permiten autonomía energética y conectividad inalámbrica. La elección de esta placa está documentada como solución efectiva en proyectos de monitoreo ambiental y sistemas IoT por su tamaño compacto, bajo consumo, soporte comunitario y capacidad de correr sistemas operativos completos útiles para cumplir en soporte para lo que se requiere en el proyecto (Soto et al., 2022; Morales-Gutiérrez & Porras-Hernández, 2021).

En cuanto al software, se eligen herramientas que aseguren robustez, portabilidad, facilidad de integración y bajo consumo de recursos. Esto incluye desde el sistema operativo ligero Raspberry Pi OS Lite, hasta lenguajes de programación como Python, que ofrecen una extensa librería para manejo de sensores, conexiones de red y procesamiento de datos. Además, se considera el uso de bases de datos como SQLite o MySQL, y plataformas de visualización como Power BI, que permiten una lectura sencilla y profesional de los datos censados, facilitando la toma de decisiones.

3.4.1. Hardware

La selección del hardware responde a las necesidades específicas del entorno donde se implementará el sistema, priorizando dispositivos que respondan y proporcionen seguridad al implementar el sistema completo. Este apartado describe los elementos principales del sistema: la unidad de procesamiento, los sensores ambientales y los componentes adicionales que garantizan la operatividad del sistema en campo.

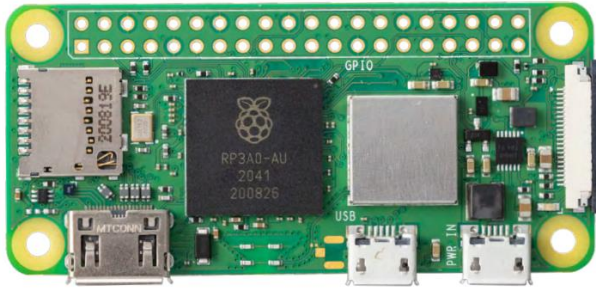
3.4.1.1. Unidad de procesamiento (Raspberry Pi Zero 2)

La Raspberry Pi Zero 2 fue seleccionada como unidad de procesamiento principal tanto para el nodo sensor como para el nodo coordinador, debido a su bajo consumo de energía, su

tamaño compacto y sus capacidades técnicas adecuadas para un entorno de monitoreo ambiental.

Figura 11.

Vista superior Placa Raspberry Pi Zero 2



Nota: Tomada de *Raspberry Pi Zero 2 W Product Brief* (Raspberry Pi Foundation, 2021).

En la Tabla 9, se detallan las características que posee esta unidad de procesamiento(microcomputadora):

Tabla 9.

Características placa Raspberry Pi Zero 2

Característica	Especificación
Modelo	Raspberry Pi Zero 2
Procesador	Broadcom BCM2710A1 (quad-core Cortex-A53)
Arquitectura	ARMv8-A de 64 bits
Frecuencia del CPU	1 GHz
Memoria RAM	512 MB LPDDR2
Conectividad inalámbrica	WiFi 802.11 b/g/n
Bluetooth	Bluetooth 4.2 (BLE)
Puertos GPIO	40 pines (compatibles con HAT)
Interfaces soportadas	GPIO, I2C, SPI, UART
Consumo energético	~0.6 W en operación básica
Dimensiones	65 mm × 30 mm
Peso	~11.5 g

Nota: Elaboración propia con base en *Raspberry Pi Zero 2 W Product Brief*(Raspberry Pi Foundation, 2021).

Su soporte para sistemas operativos basados en Linux, su compatibilidad con lenguajes como Python, y una comunidad de desarrollo existente, refuerzan su elección como placa para proyectos IoT. En comparación con microcontroladores más limitados como el ESP32, la Raspberry Pi Zero 2 ofrece mayor desarrollo para tareas computacionalmente intensivas, como el manejo de interfaces gráficas o la implementación de servidores locales.

3.4.1.2. Sensores

Los sensores seleccionados para el proyecto permiten medir las principales variables necesarias para el análisis de condiciones ambientales y el cálculo de la evapotranspiración en cultivos de nogal. Estos dispositivos fueron elegidos por su compatibilidad con la Raspberry Pi, precisión aceptable para aplicaciones agrícolas y respaldo en documentación técnica y experiencia de uso en proyectos similares.

A continuación, se explica los sensores a implementar en el proyecto:

3.4.1.2.1. Sensor *DS18B20*

El sensor DS18B20 es útil para la medición de la temperatura del suelo debido a su precisión, facilidad de conexión y encapsulado impermeable. Es usualmente utilizado en estaciones meteorológicas y se comunica mediante el protocolo 1-Wire, lo cual permite múltiples conexiones en paralelo sobre una misma línea de datos.

Este sensor posee una sonda y 3 cables los cuales 2 son para alimentación (de 3V-5V) y uno para datos como se indica en la Figura 12, el cual usualmente se lo configura a través de una resistencia en pull-up.

Figura 12.*Vista sensor DS18B20*

Nota: Tomada de *DS18B20: características del sensor de temperatura* (HWLibre, n.d.).

A continuación, la Tabla 10 resume sus características técnicas a destacar:

Tabla 10.*Características sensor DS18B20*

Parámetro	Valor
Tipo de señal	Digital (1-Wire)
Rango de medición	-55 °C a +125 °C
Precisión	±0.5 °C (en el rango de -10 °C a +85 °C)
Resolución	Programable: 9 a 12 bits
Tiempo de conversión	93.75 ms (a 12 bits)
Alimentación	3.0 V a 5.5 V
Encapsulado	Tubo metálico inoxidable tipo sonda

Nota: Elaboración propia con base en *DS18B20: Programmable resolution 1-Wire digital thermometer* (Maxim Integrated, 2020).

3.4.1.2.2. Sensor BME280

El sensor BME280, desarrollado por Bosch Sensortec, es un módulo digital de alta precisión capaz de medir temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. Su comunicación mediante el protocolo I2C permite una integración adecuada con la unidad de procesamiento seleccionada. Este sensor es ampliamente adoptado en sistemas IoT por su tamaño y versatilidad.

La Figura 13, muestra que el sensor posee 4 pines de los cuales Vin y GND son alimentación (de 3V-5V), SCL (Serial Clock Line) del protocolo I2C es la línea de reloj y el pin SDA (Serial Data Line) del protocolo I2C es la línea de datos.

Figura 13.

Vista sensor BME280



Nota: Tomada de *Sensor BME280 con salida I2C/SPI* (Grupo Electrostore, n.d.).

A continuación, la Tabla 11 resume sus características técnicas a destacar:

Tabla 11.

Características sensor BME280

Parámetro	Valor
Tipo de señal	Digital (I2C o SPI)
Variables medidas	Temperatura, humedad relativa, presión
Rango de temperatura	-40 °C a +85 °C
Precisión temperatura	±1.0 °C
Rango de humedad	0 % a 100 % HR
Precisión humedad	±3 % HR
Rango de presión	300 hPa a 1100 hPa
Precisión presión	±1 hPa
Voltaje de operación	1.71 V a 3.6 V

Nota: Elaboración propia con base en *BME280: Combined humidity and pressure sensor* (Bosch Sensortec, 2021).

3.4.1.2.3. Anemómetro WH-SP-WS01

El WH-SP-WS01 es un sensor de tipo anemómetro de cazoletas, utilizado para medición de la velocidad del viento. Su funcionamiento se basa en la rotación de tres aspas o cazoletas que, al girar por acción del viento, generan pulsos eléctricos. Estos pulsos pueden ser

contados por un sistema digital para calcular la velocidad promedio del viento durante un intervalo determinado.

Su señal de salida consiste en una línea de pulsos digitales que requiere ser leída por una entrada GPIO con interrupciones o mediante temporización controlada por software. Como se indica en la Figura 14, este anemómetro es de estructura plástica con un cable RJ11, del cual se maneja para sus conexiones e interacción con la placa de desarrollo (unidad de procesamiento seleccionada) dos cables el cual uno va a GND y el otro a través de una configuración pull-up con una resistencia.

Figura 14.

Vista anemómetro WH-SP-WS01



Nota: Tomada de Anemómetro WH-SP-WS01 para estación meteorológica (Walmart, n.d.).

A continuación, la Tabla 12 resume sus características técnicas a destacar:

Tabla 12.*Características sensor WH-SP-WS01*

Parámetro	Valor
Tipo de señal	Pulsos digitales
Rango de medición	0 a ~70 m/s
Resolución típica	2.4 km/h por pulso
Precisión	±0.5 m/s (estimada)
Tensión de operación	3.3 V – 5 V
Salida	Pulso por cada vuelta parcial del eje
Material	Plástico ABS resistente a la intemperie

Nota: Elaboración propia con base en *WH-SP-WS01: Wind Speed Sensor – Technical Specifications* (Fine Offset Electronics, 2012b).

3.4.1.2.4. Pluviómetro WH-SP-RG

El WH-SP-RG es un sensor de tipo balancín oscilante, comúnmente utilizado para medir la cantidad de precipitación acumulada. Este sensor opera mediante un sistema de cuchara basculante (tipping bucket): cada vez que se llena una de las cucharas con una cantidad específica de agua (por ejemplo, 0.3 mm), el balancín bascula, genera un pulso y vacía el recipiente.

Cada uno de estos pulsos puede ser contado por el sistema de adquisición de datos, lo que permite determinar el volumen total de precipitación en un período determinado. Su construcción es resistente a condiciones climáticas adversas, y su salida es una señal digital de tipo interruptor. La Figura 15, indica que el dispositivo posee un cable con terminal RJ11, el cual permite conectar uno de sus cables hacia GND y el otro en configuración pull-up con una resistencia.

Figura 15.

Vista pluviómetro WH-SP-RG.



Nota: Tomada de *El sensor del pluviómetro mide el volumen de lluvia pulsada para estaciones meteorológicas y Arduino* (Mecatrónica, n.d.).

A continuación, la Tabla 13 resume sus características técnicas a destacar:

Tabla 13.

Características sensor WH-SP-RG.

Parámetro	Valor
Tipo de señal	Pulsos digitales
Resolución de medición	0.3 mm por pulso (aprox.)
Tensión de operación	3.3 V – 5 V
Precisión	±5 % (en condiciones normales de operación)
Material	Plástico resistente a la intemperie
Método de recolección	Balancín con cuchara basculante
Frecuencia de basculado	Variable según intensidad de lluvia

Nota: Elaboración propia con base en *WH-SP-RG: Rain Gauge – Technical Specifications* (Fine Offset Electronics, 2012a).

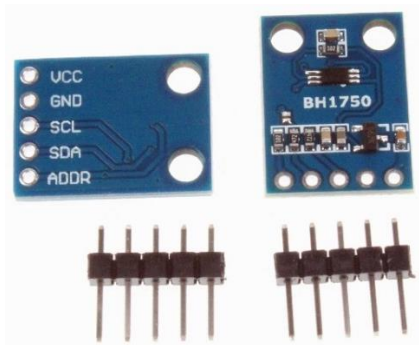
3.4.1.2.5. Sensor BH1750

El BH1750 es un sensor digital de luz ambiental de alta precisión desarrollado por Rohm Semiconductor. Está diseñado para medir la intensidad de iluminación en lux (lx) y se utiliza frecuentemente en aplicaciones como monitoreo ambiental, automatización de iluminación y estaciones meteorológicas. Este sensor cumple la función de registrar la radiación solar incidente, como parte de los parámetros ambientales requeridos para el cálculo de la evapotranspiración.

El BH1750 opera a través del protocolo I2C, facilitando su integración con microcontroladores y microcomputadores como la Raspberry Pi. También, ofrece una medición directa de luz visible, sin necesidad de cálculos adicionales, con un rango de medición entre 1 y 65,535 lux. Además, es eficiente energéticamente y tiene un diseño compacto que lo hace ideal para sistemas embebidos. En la Figura 16, muestra que el sensor posee 5 pines los cuales VCC y GND corresponden a la alimentación(3V-5V), el pin SCL es el reloj del bus I2C y se conecta a la línea SCL de la unidad de procesamiento (Raspberry Pi Zero 2), el pin SDA son los datos del bus I2C y se conecta a la línea SDA de la unidad de procesamiento y el pin ADDR es la dirección I2C alternativa. Si se conecta a VCC, la dirección cambia de 0x23 a 0x5C. Si se deja desconectado o a GND, se usa 0x23 se usa en caso se tenga 2 sensores con las mismas características como por ejemplo el BME280 que suelen ocupar la misma dirección 0x23 al ser reconocidas por la placa de procesamiento.

Figura 16.

Vista sensor BH1750



Nota: Tomada de NOYITO Sensor de intensidad de luz digital BH1750 – Paquete de 2 (Amazon, n.d.).

A continuación, la Tabla 14 resume sus características técnicas a destacar:

Tabla 14.*Características sensor BH1750*

Parámetro	Valor
Tipo de señal	Digital (I2C)
Rango de medición	1 – 65,535 lux
Resolución	1 lx
Tensión de operación	3.0 V – 5.0 V
Consumo de corriente	0.12 mA (modo activo), 0.01 μ A (modo espera)
Dirección I2C	0x23 o 0x5C (configurable)
Tiempo de respuesta	16 ms (modo rápido)
Dimensiones del módulo	~21 mm x 15 mm

Nota: Elaboración propia con base en *BH1750: Digital 16-bit serial output type ambient light sensor IC for I2C bus interface* (Rohm Semiconductor, 2021).

3.4.1.2.6. Sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0

El sensor capacitivo de humedad del suelo v2.0 mide la humedad a través de variaciones de capacitancia, en lugar de conductividad como los sensores resistivos. Este principio de funcionamiento reduce el riesgo de corrosión, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones de monitoreo a largo plazo.

Este sensor genera una salida analógica proporcional al contenido de humedad del sustrato en el que está insertado. Como la Raspberry Pi no cuenta con entradas analógicas, es necesario utilizar un convertidor ADC, en este caso el MCP3008, para traducir la señal en datos digitales que puedan ser leídos y procesados. La Figura 17, indica al sensor que físicamente incluye un área que separa los componentes electrónicos del límite donde haría contacto con la tierra. además, posee 3 pines los cuales 3 son para alimentación(3V-5V) y uno para datos.

Figura 17.

Vista sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0



Nota: Tomada de *Sensor de humedad de suelo capacitivo v2.0* (RoboticsEC, n.d.).

A continuación, la Tabla 15 resume sus características técnicas a destacar:

Tabla 15.

Características sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0

Parámetro	Valor
Tipo de señal	Analógica
Rango de medición	0 % a 100 % (interpretación relativa)
Tensión de operación	3.3 V – 5.5 V
Material del recubrimiento	PCB revestido con capa impermeable
Salida	Voltaje proporcional al nivel de humedad
Interfaz	Requiere conversión ADC (por ejemplo, MCP3008)
Longitud del sensor	~60 mm (zona de inserción)

Nota: Elaboración propia con base en *Gravity: Sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0* (DFRobot, n.d.-a).

3.4.1.3. Componentes Adicionales

Además de los sensores y la unidad de procesamiento, el proyecto requiere componentes complementarios que aseguren su operatividad, su capacidad de comunicación y su resistencia ambiental. La Tabla 16, indica varios componentes adicionales que permiten estructurar y desarrollar el proyecto adecuadamente:

Tabla 16.*Componentes adicionales utilizados en el sistema*

Componente	Función principal	Especificaciones clave
Conversor ADC MCP3008	Convierte señales analógicas (sensor de humedad de suelo) en digitales para la Raspberry Pi	10 bits de resolución, 8 canales analógicos, comunicación SPI
Batería recargable Li-Ion/Power Bank	Almacena energía	5V / 20000 Wh
Estructura nodo sensor	Ubican todos los componentes electrónicos (sensores, cables, caja de protección) pertenecientes al nodo sensor.	Tol y tubo de acero soldados con altura de 2.5 metros.
Cables y conectores sellados	Permiten conexiones entre sensores y Raspberry Pi en exteriores sin riesgo de corrosión	Cables jumpers, cables de timbre, cables de cable UTP, etc
Cajas de Protección	Albergar los componentes electrónicos, conexiones físicas de los sensores y alimentación	Caja de impresión 3D, caja de acrílico transparente

Nota: Elaboración propia con base en fichas técnicas *MCP3008 - 8-Channel 10-Bit ADC* (Adafruit, 2020) y *Gravity: Solar Power Manager 5V* (DFRobot, n.d.-b).

3.4.2. *Arquitectura*

La arquitectura del sistema propuesto responde a un modelo centralizado de adquisición de datos en el que un nodo sensor principal, basado en una Raspberry Pi Zero 2 que actúa como centro de recolección, procesamiento inicial y transmisión de datos climáticos hacia un nodo controlador remoto. Esta estructura fue diseñada específicamente para operar dentro de una plantación de nogales, con el fin de monitorear en tiempo real variables agroclimáticas esenciales para la estimación de la evapotranspiración y la gestión hídrica del cultivo.

El nodo sensor constituye una estación meteorológica compacta y fija, que agrupa múltiples sensores dentro de una misma estructura física. Algunos sensores se conectan directamente a la Raspberry Pi mediante cableado interno, debido a su cercanía dentro del prototipo. Esta configuración permite reducir la complejidad del despliegue en campo, facilitar el mantenimiento y disminuir la susceptibilidad a interferencias. Entre los sensores integrados se incluyen: BME280 y DS18B20 (temperatura y humedad), WH-SP-WS01 (anemómetro),

WH-SP-RG (pluviómetro), BH1750 (radiación solar) y un sensor capacitivo v2.0 con ADC (humedad del suelo).

La Raspberry Pi Zero 2 se encarga de la adquisición de datos, su preprocesamiento, y el envío periódico hacia el nodo controlador mediante una conexión a Internet (WiFi). El nodo controlador, instalado fuera del área de cultivo, recibe los datos y los almacena en una base de datos estructurada. Posteriormente, estos datos pueden ser visualizados mediante una interfaz web, y utilizados para ejecutar modelos de cálculo como Penman-Monteith o Hargreaves y el análisis histórico a través de una plataforma de Business Intelligent.

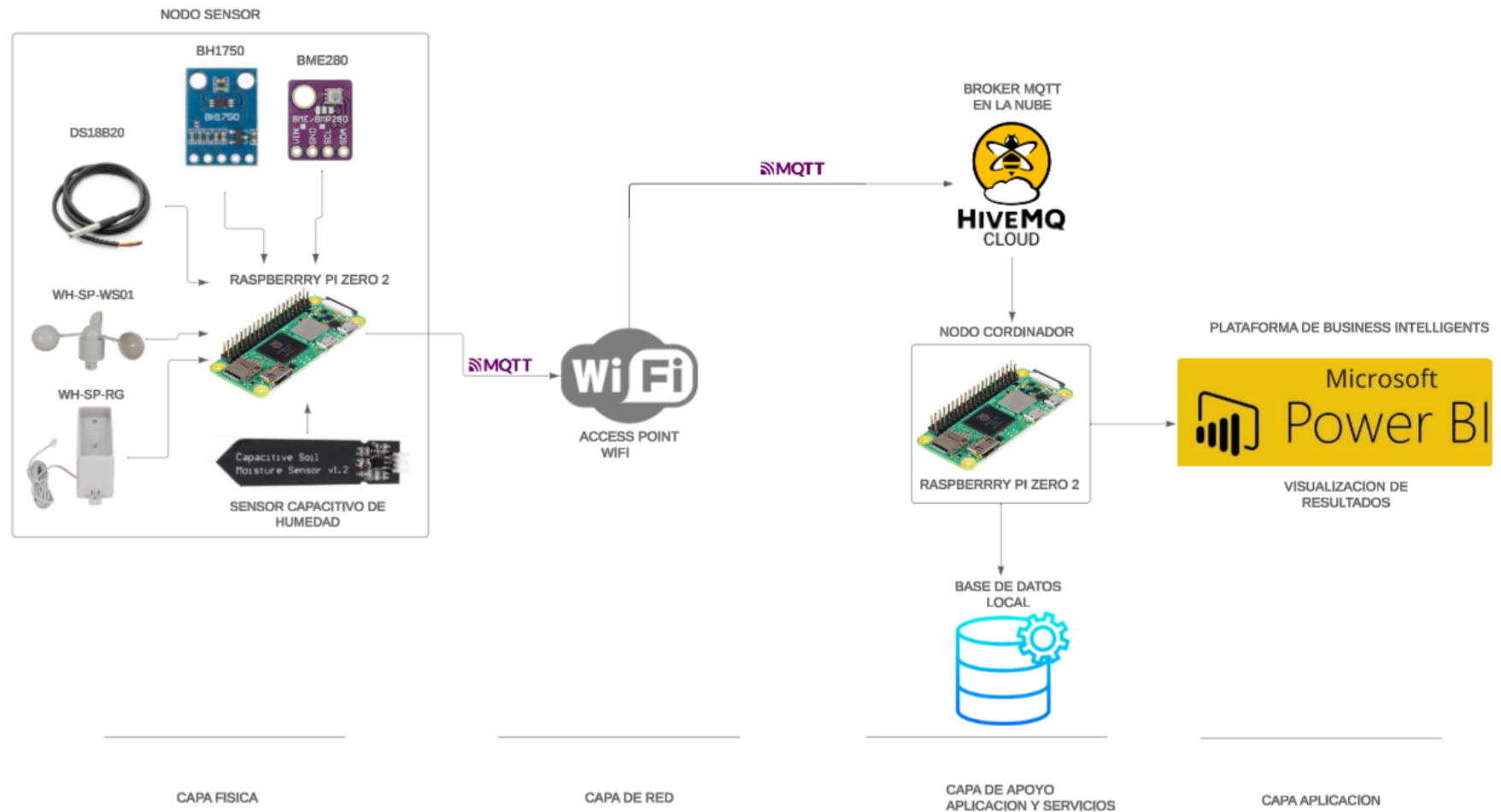
Es importante destacar que, a pesar de incluir múltiples sensores, este sistema no constituye una red de sensores inalámbricos (WSN). En una WSN, los sensores están distribuidos físicamente en distintos puntos del terreno y se comunican entre sí mediante enlaces inalámbricos multisalto. En contraste, el sistema diseñado aquí responde a una arquitectura IoT de adquisición centralizada, donde todos los sensores están conectados a un único nodo, el cual transmite los datos directamente al sistema central de gestión a través de Internet (R. González et al., 2020) (Jiménez & Toledo, 2021).

La Figura 18, indica la arquitectura del proyecto distribuido en cuatro capas, conforme al modelo de referencia IoT. En la capa física se ubican los sensores ambientales (BME280, DS18B20, WH-SP-WS01, WH-SP-RG, BH1750 y un sensor capacitivo de humedad), todos conectados a una Raspberry Pi Zero 2 que actúa como nodo sensor. Este nodo recolecta los datos y los transmite, mediante el protocolo MQTT sobre Wi-Fi, hacia un segundo microcomputador, también una Raspberry Pi Zero 2, que funciona como nodo coordinador. La capa de red contempla el canal de comunicación entre ambos nodos y el broker MQTT que gestiona la transferencia de mensajes. En la capa de apoyo, aplicación y servicios, los datos son almacenados en una base de datos local de tal forma que permite el monitoreo continuo.

Finalmente, en la capa de aplicación, se integran herramientas como Power BI para ofrecer análisis avanzados, visualización de resultados y acceso remoto a los datos censados.

Figura 18.

Arquitectura del proyecto



Nota: Elaboración Propia.

Funcionalmente, el sistema responde a los objetivos establecidos para el monitoreo de variables climáticas. La separación física entre el nodo sensor (en campo) y el nodo controlador (en un entorno con conectividad estable) permite superar limitaciones típicas de terreno, cobertura o mantenimiento. Además, al concentrar todos los sensores en una única estación meteorológica cableada, se reducen los costos y complejidades asociadas a una red inalámbrica multisalto, sin comprometer la cobertura deseada, ya que todos los sensores están ubicados en la misma unidad física.

3.4.3. Software

El software en este sistema cumple funciones clave que abarcan desde la adquisición de datos en el nodo sensor hasta su procesamiento, almacenamiento y visualización en el nodo coordinador. La elección de cada herramienta se fundamenta en su compatibilidad con el hardware seleccionado (principalmente la Raspberry Pi Zero 2), soporte, facilidad de integración con tecnologías IoT y conocimiento sobre su uso y programación.

El software se organiza en tres puntos:

1. Sistema operativo base.
2. Lenguaje de programación para la lógica del sistema.
3. Herramientas complementarias para bases de datos, interfaces y visualización.

A continuación, se detallan los elementos seleccionados:

3.4.3.1. Sistema Operativo

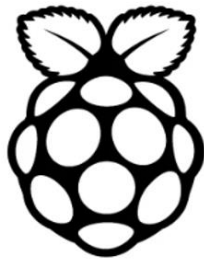
El sistema operativo utilizado es Raspberry Pi OS Lite (64-bit), una distribución basada en Debian optimizada para Raspberry Pi. Esta versión liviana no posee entorno gráfico, lo cual reduce significativamente el consumo de recursos y mejora el rendimiento en tareas orientadas a procesamiento de datos, ideal para la aplicación que se le va a dar del proyecto. Además, que

con las especificaciones de procesamiento y memoria que posee Raspberry Pi Zero 2 es útil para la implementación del proyecto.

Figura 19.

Raspberry Pi OS Lite

Raspberry Pi Lite



Nota: Tomada de *Raspberry Pi OS Lite: Desktop nachinstallieren und VNC einrichten* (Raspberry Pi Welt, n.d.).

Algunas ventajas que destacan son:

- Compatibilidad nativa con Python, Node-RED y librerías I2C/SPI.
- Acceso a una gran comunidad y repositorios de paquetes.
- Actualizaciones constantes
- Bajo uso de memoria y almacenamiento.

Este sistema será instalado tanto en el nodo sensor como en el nodo coordinador, permitiendo una arquitectura uniforme y facilitando la implementación de servicios de red, bases de datos, clientes MQTT, entre otros.

3.4.3.2. Lenguaje de programación

El sistema de monitoreo se desarrolla utilizando el lenguaje de programación Python, una herramienta ampliamente utilizada en entornos de prototipado electrónico e Internet de las Cosas (IoT) por su facilidad de uso y la disponibilidad de bibliotecas orientadas al manejo de hardware. Python ofrece compatibilidad nativa con plataformas como Raspberry Pi, facilitando

el control de sensores a través de protocolos como I2C, SPI y UART, así como la implementación de servicios de red, procesamiento de datos y automatización de tareas.

Entre las bibliotecas destacadas que se emplean para interactuar con los sensores y el hardware de la Raspberry Pi se encuentran RPi.GPIO, smbus2, spidev y Adafruit_Blinka, entre otras, las cuales permiten una programación sencilla pero acertada para la aplicación que se le quiere dar. Asimismo, Python permite integrar servicios complementarios como bases de datos relacionales (sqlite3, MySQL) e incluso crear interfaces web básicas para visualización de datos mediante herramientas como Flask o Dash.

Figura 20.

Logo lenguaje de programación Python



Nota: Tomada de *Módulo Máster Introduction To Python* (DCNC Sciences, n.d.).

Además, por su sintaxis clara y enfoque modular hace que Python sea una excelente elección permitiendo una estructura de código fácil de implementar, editar y adaptable a futuras actualizaciones o ampliaciones del sistema (Gómez & Rodríguez, 2020; López & Fernández, 2019).

3.4.3.3. Herramientas complementarias

Además del sistema operativo y el lenguaje de programación seleccionado, se incorporaron herramientas complementarias que facilitan el almacenamiento, visualización y gestión automatizada de los datos recolectados por el sistema.

3.4.3.3.1. Base de Datos

Se optó por utilizar SQLite como sistema de gestión de base de datos debido a su arquitectura liviana, su portabilidad y su capacidad para operar sin necesidad de un servidor central. Estas características la convierten en una opción adecuada para sistemas embebidos como la Raspberry Pi Zero 2 W. Según Gaffney (2022), SQLite es ideal para aplicaciones que requieren acceso rápido a datos estructurados en dispositivos con recursos limitados, como es el caso de muchos sistemas IoT.

Esta base permite el almacenamiento local de las lecturas ambientales mediante transacciones seguras y consistentes. Diversos estudios han demostrado que SQLite presenta un rendimiento eficiente en escenarios de lectura frecuente con baja concurrencia, lo cual se ajusta al patrón de datos generado por los sensores en campo (Özmen & Ertugrul, 2025).

3.4.3.3.2. Automatización y scripting

Para lograr una operación autónoma, se utilizó el programador de tareas “cron”, que permite ejecutar scripts automáticamente al iniciar el sistema o en horarios definidos. De este modo:

- Al arrancar y/o reiniciar el nodo coordinador y sensor, se ejecutan automáticamente los scripts necesarios para que sea automático en su totalidad
- A horarios específicos, el cron se configura para la ejecución de ciertos archivos y scripts que son necesario que se activen y actualicen según la aplicación

Este enfoque simplifica la operación del sistema en campo y reduce la necesidad de intervención manual constante.

3.4.3.3.3. Visualización de datos

Para el análisis visual y gráfico de los datos recolectados, se utiliza la herramienta Power BI. Esta plataforma permite crear paneles interactivos y reportes personalizados a partir de archivos CSV generados por el sistema. Garadasu et al. (2025) destacan que Power BI es

una herramienta poderosa para el análisis descriptivo, ya que permite transformar datos en representaciones visuales comprensibles para facilitar la toma de decisiones.

A pesar de que Power BI no tiene soporte directo para SQLite, es posible conectar los datos mediante exportaciones intermedias a CSV o a través de conectores ODBC personalizados. Estas soluciones han sido aplicadas en proyectos similares para integrar bases de datos embebidas con plataformas de análisis.

Figura 21.

Logo Power BI



Nota: Tomada de *Học Power BI* (FTP Shop, n.d.).

3.4.3.3.4. Broker MQTT en la Nube

El sistema se apoya en el protocolo MQTT para la comunicación entre el nodo sensor y el nodo coordinador, empleando como broker un servicio seguro en la nube proporcionado por HiveMQ. Esta herramienta actúa como intermediario eficiente entre scripts Python distribuidos en ambos nodos, permitiendo una comunicación asincrónica y confiable. Según Greptime (2024), el uso de brokers MQTT gestionados facilita la escalabilidad y el mantenimiento de soluciones IoT, especialmente en entornos rurales o con conectividad limitada.

Figura 22.

Logo HIVEMQ CLOUD



Nota: Tomada de *Get HiveMQ* (HiveMQ, n.d.).

3.5. Diseño del sistema

El sistema diseñado para el monitoreo de evapotranspiración en cultivos de nogales se construye bajo un enfoque que integra sensores ambientales, unidades de procesamiento embebidas, protocolos de comunicación, mecanismos de almacenamiento y visualización local. Esta sección describe la estructuración técnica de los principales subsistemas involucrados, abarcando desde la adquisición de datos hasta su transmisión y almacenamiento.

3.5.1. Diseño modular del hardware

El diseño modular del sistema permite una estructura flexible donde cada componente cumple una función específica dentro del proceso de monitoreo ambiental. Esta estructura facilita tanto el diagnóstico de fallos como futuras ampliaciones o mejoras del sistema.

El sistema completo se distribuye en dos nodos principales: el nodo sensor, encargado de recolectar los datos en campo, y el nodo coordinador, responsable del procesamiento, almacenamiento y visualización de la información. Ambos nodos se construyen con una Raspberry Pi Zero 2 W, que actúa como unidad de procesamiento central.

El diseño modular se organiza de la siguiente manera:

1. Módulo de percepción: agrupa los sensores encargados de medir variables ambientales relevantes para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0).
Estos incluyen:
 - BME280: mide temperatura, humedad relativa y presión atmosférica.
 - BH1750: sensor de radiación solar.
 - DS18B20: mide la temperatura del suelo.
 - Sensor capacitivo v2.0 + ADC MCP3008: mide la humedad del suelo.
 - WH-SP-WS01: anemómetro para velocidad del viento.
 - WH-SP-RG: pluviómetro para precipitación.
2. Módulo de procesamiento: la Raspberry Pi Zero 2 W recibe y procesa los datos de los sensores, gestionando las conexiones físicas mediante puertos GPIO, I2C, SPI y One-Wire. Su arquitectura ARM de cuatro núcleos ofrece un equilibrio entre consumo energético y capacidad de procesamiento adecuado para entornos embebidos (García & Ruiz, 2021).
3. Módulo de comunicación: se encarga de transmitir los datos mediante protocolo MQTT sobre Wi-Fi hacia el broker en la nube. La misma Raspberry Pi cumple esta función, evitando el uso de módulos externos.
4. Módulo de energía: en esta etapa de implementación se emplea una fuente directa de alimentación mediante adaptador USB.

Esta segmentación funcional garantiza un diseño organizado, fácil de mantener y reproducible. Como se está desarrollando un proyecto de ingeniería basado en sistemas IoT, el enfoque modular es clave para asegurar sostenibilidad en el tiempo (Sierra & Bonilla, 2021).

3.5.2. Diagramas eléctricos y electrónicos

El diseño eléctrico y electrónico del sistema se realizó tomando en cuenta las conexiones necesarias entre la Raspberry Pi Zero 2 W y los distintos sensores empleados. No

se utilizó ningún microcontrolador intermedio, ya que todos los sensores están conectados directamente a la Raspberry, aprovechando sus interfaces digitales disponibles (I2C, SPI, GPIO y One-Wire).

A continuación, se describe de manera general cómo están conectados los sensores:

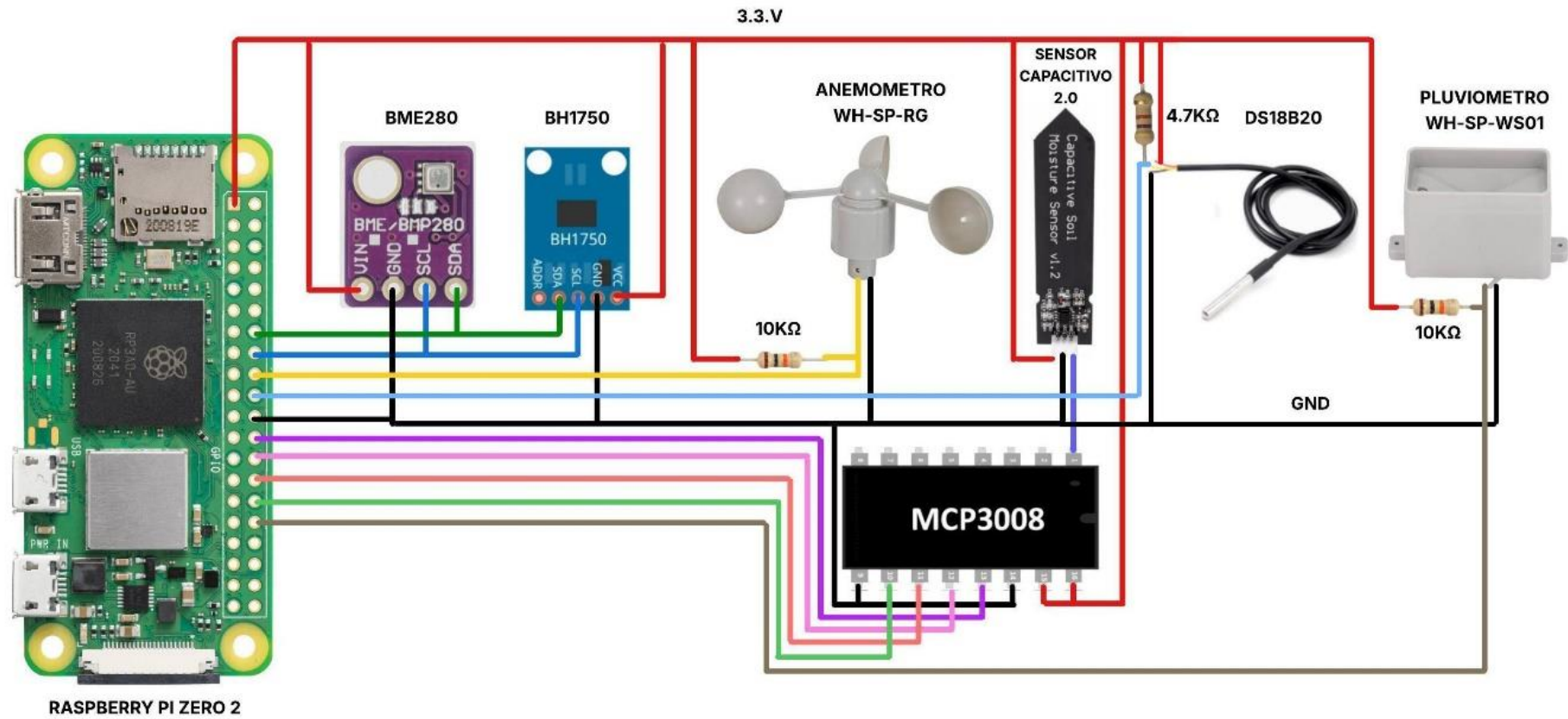
- BME280 y BH1750: ambos sensores usan el protocolo I2C y se conectan al mismo bus, utilizando los pines SDA y SCL de la Raspberry Pi.
- DS18B20: este sensor de temperatura para suelo se conecta a un pin GPIO configurado para comunicación One-Wire, con una resistencia de pull-up de $4.7\text{ k}\Omega$ entre datos y 3.3 V .
- Sensor capacitivo de humedad del suelo: este sensor entrega una señal analógica, por lo que se conecta a un canal del conversor ADC MCP3008, el cual se comunica con la Raspberry Pi a través del bus SPI.
- WH-SP-WS01 (anemómetro) y WH-SP-RG (pluviómetro): estos sensores generan pulsos digitales que se reciben mediante pines GPIO configurados para contar interrupciones. Se los conecta mediante un arreglo en configuración pull-up con una resistencia de $10\text{ k}\Omega$.

En la implementación se usaron cables jumpers con conectores hembra para facilitar el montaje y desmontaje, y se procuró mantener las conexiones ordenadas para identificar su origen y destino físicamente.

Este tipo de diseño simple y directo es adecuado como prototipo funcional en entornos de pruebas, especialmente cuando se busca validar el funcionamiento del sistema en condiciones reales antes de escalar su producción (Cedeño & Salazar, 2020). En la Figura 23, se indica el diagrama eléctrico implementado para el nodo sensor siendo este el nodo que se destaca por contener la mayoría de las conexiones electrónicas:

Figura 23.

Diagrama Eléctrico



Nota: Elaboración Propia

3.5.3. *Diseño del sistema de adquisición de datos*

El sistema de adquisición de datos tiene como propósito recolectar de manera periódica y confiable las variables ambientales necesarias para el monitoreo de las condiciones del cultivo y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Esta tarea se realiza a través del nodo sensor, compuesto por una Raspberry Pi Zero 2 W y un conjunto de sensores ambientales.

El script `publicador.py`, desarrollado en Python, es el encargado de gestionar todo el proceso de adquisición. Este se inicia automáticamente al arrancar el sistema, gracias a la configuración del archivo `crontab`, y opera de forma indefinida mientras el nodo esté encendido.

El funcionamiento del sistema sigue los siguientes pasos:

1. Lectura de sensores: cada ciclo de adquisición comienza con la llamada a funciones específicas que leen las variables proporcionadas por los sensores conectados:
 - `leer_bme280()` obtiene la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica.
 - `leer_bh1750()` mide la intensidad de luz ambiental.
 - `leer_ds18b20()` lee la temperatura del suelo.
 - `leer_humedad_capacitivo()` obtiene el voltaje de salida del sensor de humedad del suelo a través de un conversor ADC MCP3008.
 - `leer_anemometro()` mide la velocidad del viento.
 - `leer_pluvio()` cuenta los eventos de lluvia registrados.
2. Estructuración de los datos: las lecturas son combinadas en un diccionario Python y luego convertidas a formato JSON, el cual es ideal para la transmisión ligera de datos en sistemas IoT.

3. Publicación por MQTT: el JSON generado se envía al broker MQTT de HiveMQ Cloud a través del tópico estacion/sensores/lecturas. El envío se realiza cada 5 minutos, permitiendo un monitoreo casi en tiempo real.

Este diseño permite que el nodo sensor funcione de forma autónoma, generando y transmitiendo los datos sin intervención manual. Además, la separación en funciones para cada sensor hace que el sistema sea modular y fácil de mantener o actualizar si se agregan nuevos sensores en el futuro.

La elección de un enfoque por scripts en Python, junto con MQTT y JSON, proporciona una solución ampliamente utilizada en sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo (Aguilar & Romero, 2020).

3.5.4. *Diseño del sistema de comunicación inalámbrica*

El sistema de comunicación inalámbrica juega un papel fundamental en la transmisión de los datos desde el nodo sensor hacia el nodo coordinador. Para ello, se implementó el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) sobre una red Wi-Fi con cifrado TLS, utilizando el servicio HiveMQ Cloud como broker de intermediación.

Este protocolo fue elegido debido a su bajo consumo de ancho de banda, simplicidad y eficiencia en aplicaciones de monitoreo en tiempo real, características que lo hacen ampliamente usado en entornos IoT (Villamarín & Andrade, 2021).

3.5.4.1. Transmisión desde el nodo sensor

El nodo sensor, basado en una Raspberry Pi Zero 2 W, ejecuta el script publicador.py. Este establece una conexión segura al broker de HiveMQ mediante el puerto 8883 y utilizando el protocolo TLS para garantizar la integridad y confidencialidad de la información transmitida. Las credenciales de acceso (usuario y contraseña) se definen de forma segura en el mismo script.

Cada 5 minutos, el sistema toma lecturas de los sensores ambientales y forma un mensaje en formato JSON. Este mensaje contiene variables como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, luminosidad, velocidad del viento, precipitaciones, temperatura del suelo, humedad del suelo (voltaje del sensor capacitivo), entre otros. Posteriormente, el mensaje es publicado en el tópico MQTT: estacion/sensores/lecturas.

3.5.4.2. Recepción y procesamiento en el nodo coordinador

El nodo coordinador, también basado en una Raspberry Pi Zero 2 W, ejecuta el script `coordinador.py`, que se suscribe al mismo tópico MQTT. Al recibir un mensaje, decodifica el contenido JSON y lo procesa para:

- Calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0) usando la fórmula de Penman-Monteith.
- Registrar todas las variables en una base de datos SQLite (`sensores_data.db`) junto con un sello de tiempo.
- Imprimir por consola los datos recibidos, como medio de verificación en tiempo real.

Este modelo de comunicación entre nodos es del tipo *publish-subscribe*, lo que significa que ambos dispositivos están desacoplados y no requieren conocerse directamente, permitiendo estar en diferentes ubicaciones y en distintas redes. Esto permite escalar el sistema fácilmente, ya que otros nodos o aplicaciones podrían suscribirse al mismo tópico para recibir la información.

La arquitectura MQTT sobre TLS permite mantener un equilibrio entre seguridad, eficiencia y simplicidad, lo cual es ideal para sistemas IoT en zonas rurales o agrícolas donde la conectividad puede ser limitada, pero se requiere confiabilidad (Carranza & Peñafiel, 2022).

3.6. Programación del sistema

La programación del sistema es de las etapas más importantes dentro del desarrollo del prototipo, ya que define el comportamiento funcional de cada nodo y permite la integración

entre los sensores, la transmisión de datos y el almacenamiento de información. En este proyecto se ha optado por utilizar el lenguaje Python debido a su compatibilidad con plataformas embebidas como la Raspberry Pi, su extensa comunidad y su amplio soporte para bibliotecas científicas, de comunicación y manipulación de datos.

El desarrollo se divide en dos partes principales:

- Nodo sensor, encargado de adquirir los datos de los sensores conectados, formatearlos y transmitirlos periódicamente mediante el protocolo MQTT.
- Nodo coordinador, cuya función es recibir los datos enviados, procesarlos para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0) y almacenarlos de forma organizada en una base de datos local.

A continuación, se describe el funcionamiento general de los scripts utilizados, junto con los algoritmos principales implementados para cada tarea, haciendo énfasis en la lógica aplicada, la modularidad del código y el tratamiento de los datos adquiridos.

3.6.1. Algoritmo general de adquisición de datos

El algoritmo general de adquisición de datos implementado en el nodo sensor sigue una lógica cíclica, modular y continua, orientada a recolectar en tiempo real las variables ambientales necesarias para el monitoreo de condiciones agroclimáticas en el cultivo de nogales. Esta lógica está contenida en el script `publicador.py`, el cual se ejecuta automáticamente al arrancar el sistema, gracias a su configuración en el archivo `crontab` (ver Anexo M).

El proceso general se puede describir en los siguientes pasos:

1. Inicialización del sistema: se establece la conexión segura con el broker MQTT de HiveMQ Cloud. Esto incluye la definición del nombre del servidor, el puerto 8883 para TLS, credenciales de autenticación y activación del cifrado para garantizar la privacidad en la transmisión de datos.

2. Lectura de sensores: se invocan funciones específicas para la adquisición de datos desde cada sensor. Como ya se especificó anteriormente, cada variable registrada está en un formato de unidad acorde a lo que se mide.
3. Empaquetado de datos: los datos adquiridos se agrupan en un diccionario unificado y se convierten a formato JSON, lo que facilita su envío y posterior procesamiento en el nodo coordinador.
4. Transmisión periódica: cada 5 minutos, el mensaje JSON es publicado en el tópico MQTT “estacion/sensores/lecturas”, lo que permite el monitoreo en tiempo real.
5. Finalización segura: si el script es interrumpido, se ejecuta una rutina de desconexión limpia del broker, evitando errores o procesos colgados.

Este algoritmo se encuentra programado íntegramente en Python, con una estructura clara y modular que permite una fácil adaptación ante cambios de sensores o condiciones operativas (ver Anexo A).

3.6.2. Programación de Sensores

Cada sensor empleado en el nodo sensor fue programado de forma independiente mediante funciones específicas, organizadas en módulos separados para facilitar su reutilización, calibración y mantenimiento. Estas funciones son importadas directamente por el script principal publicador.py (ver Anexo A), lo que permite una estructura ordenada y modular en el desarrollo del sistema.

A continuación, se describe brevemente la programación implementada para cada sensor:

- Sensor BME280 (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica): Se utiliza una biblioteca compatible para I2C que permite leer los tres parámetros con una sola llamada permitiendo conectar sus pines de datos de forma cooperativa. La

función `leer_bme280()` retorna un diccionario con las variables normalizadas, y maneja automáticamente la calibración interna del sensor (ver Anexo F, sección de importación `from bme280 import leer_bme280`).

- Sensor BH1750 (iluminancia): Se emplea comunicación I2C para obtener mediciones de intensidad de luz en lux. La función `leer_bh1750()` convierte los datos puros en valores útiles para evaluar la radiación solar aproximada, empleada posteriormente en el cálculo de ET_0 (ver Anexo E).
- Sensor DS18B20 (temperatura del suelo): Este sensor de un solo hilo (1-Wire) requiere una configuración especial del kernel para habilitar su lectura. La función `leer_ds18b20()` lee el archivo del sistema donde el sensor publica sus valores, extrayendo la temperatura en grados Celsius (ver Anexo H).
- Sensor capacitivo v2.0 (humedad del suelo): Dado que este sensor entrega una señal analógica, se emplea un conversor ADC MCP3008 conectado por SPI. La función `leer_humedad_capacitivo()` accede al canal correspondiente y devuelve el valor de voltaje, el cual representa el nivel de humedad en el suelo (ver Anexo G).
- Anemómetro (velocidad del viento): Este sensor se basa en interrupciones generadas por el paso de una hélice magnética. La función `leer_anemometro()` contabiliza impulsos durante un intervalo de tiempo y los convierte en velocidad en m/s (ver Anexo D).
- Pluviómetro (precipitación): El sensor funciona con una cuchara basculante que activa un contacto magnético. La función `leer_pluvio()` cuenta los eventos de vuelco (impulsos digitales) acumulados durante la ejecución del script (ver Anexo D).

Cada una de estas funciones está diseñada para retornar valores simples y certeros los cuales se integran sincrónicamente en el ciclo principal de adquisición del sistema. El enfoque

modular permite que los sensores puedan ser probados o reemplazados de forma individual sin modificar el resto del código.

3.6.3. Programación de comunicación inalámbrica

La transmisión de datos desde el nodo sensor hacia el nodo coordinador se realiza de manera inalámbrica utilizando el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). La comunicación fue implementada en ambos nodos mediante la librería `paho.mqtt.client` de Python, que facilita la conexión, autenticación, publicación y suscripción de mensajes en un broker MQTT en la nube, específicamente HiveMQ Cloud, el cual permite conexiones seguras mediante TLS.

Para el nodo sensor, el script `publicador.py` establece la conexión con el broker utilizando el nombre del host, el puerto 8883 (TLS), y las credenciales configuradas (usuario y contraseña). Se define un tópico MQTT llamado "estacion/sensores/lecturas" como canal de publicación. Luego, cada 5 minutos, se envía un mensaje en formato JSON con los datos adquiridos desde los sensores (ver Anexo A).

Esta conexión es persistente mientras el sistema esté en funcionamiento, y se maneja automáticamente su reconexión en caso de interrupciones.

Por otro lado, para el nodo coordinador el script `coordinador.py` se suscribe al mismo tópico "estacion/sensores/lecturas" y escucha constantemente los mensajes entrantes. Al recibir cada publicación, el contenido JSON es decodificado, procesado y posteriormente almacenado en la base de datos junto con el cálculo de la evapotranspiración de referencia ET_0 (ver Anexo B).

La comunicación inalámbrica está protegida mediante cifrado TLS, lo que garantiza la integridad de los datos en tránsito, cumpliendo con buenas prácticas de seguridad en entornos de monitoreo remoto. Esta implementación asegura una transmisión segura y en tiempo real de

las variables climáticas, permitiendo que el nodo coordinador actúe como centro de procesamiento local, sin depender de una conexión continua a internet.

3.6.4. Programación para almacenamiento

El nodo coordinador cuenta con una rutina automatizada para almacenar localmente los datos ambientales recibidos a través del protocolo MQTT, y gestionar dicha información para su posterior análisis. Esta funcionalidad se implementó utilizando la biblioteca sqlite3 de python, que permite operar con bases de datos locales sin requerir un servidor adicional.

3.6.4.1. Creación y estructura de la Base de Datos

Al iniciar el script `coordinador.py`, se verifica la existencia de una base de datos llamada `sensores_data.db`. En caso de no existir, se crea automáticamente con una tabla denominada `lecturas`, que contiene las siguientes columnas (ver Anexo B):

- `timestamp`: marca temporal de la medición.
- `temperatura`, `humedad`, `presión`: variables medidas por el BME280.
- `lux`: iluminancia desde el BH1750.
- `temperatura_suelo`: lectura del DS18B20.
- `voltaje`, `humedad_suelo`: voltaje desde sensor capacitivo v2.0.
- `vel_viento`: velocidad del viento desde anemómetro.
- `lluvia`: eventos de precipitación.
- `et0`: evapotranspiración de referencia calculada.

Los datos son insertados fila por fila en cada nuevo mensaje recibido adjunto con fecha y hora de la lectura, lo que permite llevar un registro cronológico detallado de todas las lecturas del sistema.

3.6.4.2. Cálculo y resumen diario automatizado

De forma adicional, se implementó el script `calcular_et0_diaria.py`, el cual se ejecuta una vez al día mediante una entrada en el archivo `crontab` (ver Anexo C y M). Este script realiza

una consulta SQL sobre las lecturas acumuladas y genera un resumen diario con métricas agregadas como:

- ETo acumulada.
- Total de eventos de lluvia.
- Promedio de humedad del suelo.
- Temperatura máxima y humedad mínima del día.
- Número de horas con viento elevado.

El resultado se exporta automáticamente en un archivo CSV denominado resumen_et0_diario.csv, el cual se copia además a una carpeta compartida del sistema para facilitar el acceso desde Power BI.

Esta estrategia permite mantener un sistema autónomo, capaz de recolectar, procesar y resumir datos sin necesidad de intervención manual, asegurando así la continuidad del monitoreo.

3.7. Implementación física del sistema

La implementación física del sistema de monitoreo ambiental comprende la planificación y disposición de los componentes electrónicos en el entorno real de operación, considerando las condiciones propias de la plantación de nogal y las limitaciones del entorno agrícola. Esta etapa resulta fundamental para garantizar que el sistema diseñado pueda operar de manera confiable y continua bajo condiciones ambientales variables.

En esta sección se describen los criterios considerados para la ubicación y el montaje de los nodos del sistema, así como las medidas adoptadas para la protección de los componentes electrónicos frente a factores externos como la humedad, el polvo, la radiación solar y posibles interferencias físicas.

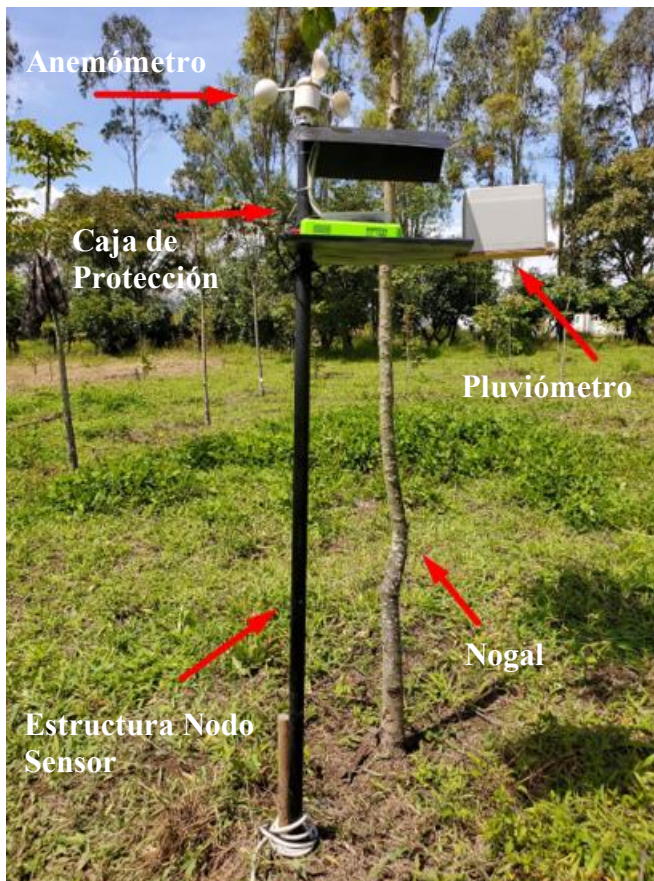
3.7.1. *Elaboración de Nodo Sensor y Coordinador*

La construcción física del nodo sensor y del nodo coordinador se realizó bajo un enfoque práctico orientado a la robustez mecánica, protección ambiental y organización adecuada de los componentes electrónicos, permitiendo que el sistema opere de forma confiable en un entorno agrícola real.

Para el nodo sensor se implementó una estructura principal basada en un mástil fabricado con tubo de acero, el cual sirve como soporte vertical para la fijación de los sensores y de los elementos de protección. Esta estructura metálica fue anclada firmemente al suelo, garantizando estabilidad frente a condiciones de viento y evitando vibraciones que puedan afectar las mediciones del anemómetro.

Figura 24.

Estructura tipo estación meteorológica-Nodo sensor en campo



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Con el fin de proteger los dispositivos electrónicos y prolongar su vida útil, se incorporó un techo y una base elaborados con láminas de tol, los cuales actúan como protección frente a la lluvia. Esta cubierta reduce la exposición térmica sobre la caja electrónica y previene la acumulación de humedad.

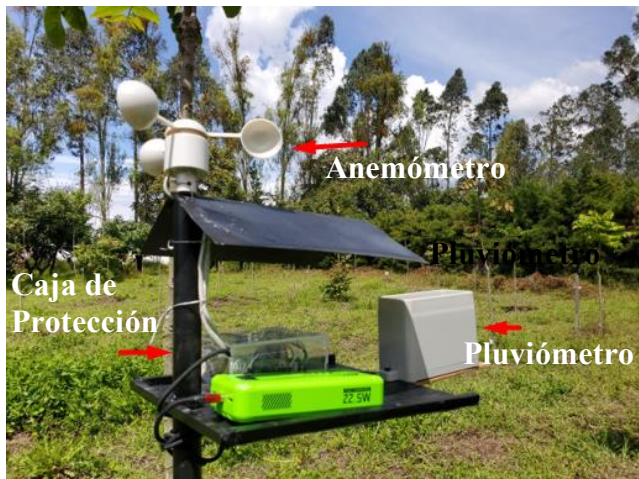
Los sensores fueron ubicados estratégicamente alrededor del mástil considerando su función específica:

- El anemómetro en la parte superior, libre de obstáculos.
- El sensor de temperatura y humedad del aire dentro de una caja de protección de acrílico transparente en la base alta de la estructura.
- El sensor de humedad y temperatura del suelo insertado en la zona radicular del cultivo.
- El pluviómetro ubicado en la base alta de la estructura sin obstrucciones.

La unidad de procesamiento, compuesta por la Raspberry Pi Zero 2, elementos y módulos electrónicos fue instalada dentro de una caja de acrílico transparente, la cual permite la visualización interna de los componentes y al mismo tiempo brinda protección frente al polvo, humedad y agentes externos. Esta caja fue fijada al mástil sobre la base alta techada, asegurando una disposición ordenada del cableado y facilitando labores de mantenimiento.

Figura 25.

Vista superior de nodo sensor, sensores y caja acrílica de protección



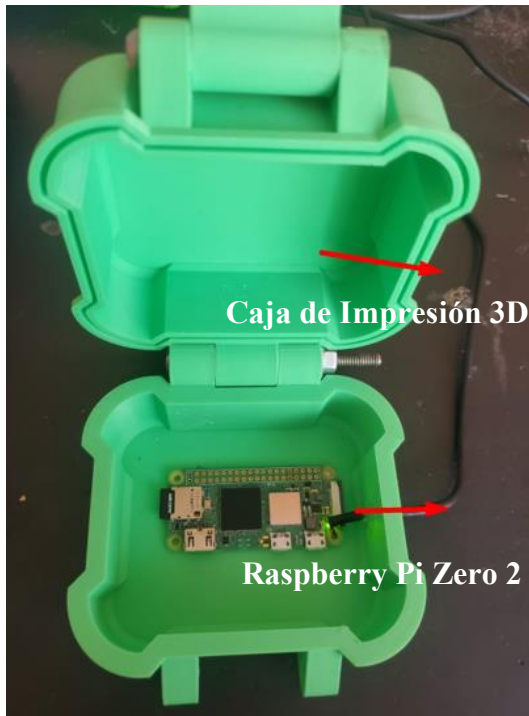
Nota: Fotografía tomada por el autor.

Por su parte, el nodo coordinador, se lo cubrió y ubico en una caja de impresión 3D color verde. Este nodo como tiene la característica de no incluirse en el campo toma un rol más móvil. Este nodo se lo ubica en un espacio donde sea de fácil acceso, con conexión a internet y energía.

La elaboración física de ambos nodos permitió integrar de forma efectiva el diseño electrónico con una estructura mecánica adecuada para el trabajo en campo, constituyendo un prototipo funcional y adaptable a condiciones reales de monitoreo ambiental agrícola.

Figura 26.

Nodo Coordinador, compuesto por placa Raspberry Pi Zero 2, caja de protección y cable de energía



Nota: Fotografía tomada por el autor.

3.7.2. Distribución y ubicación de nodos en campo.

Una vez construida la estructura física del nodo sensor, se procedió a su ubicación dentro del terreno de cultivo considerando criterios técnicos que garanticen la representatividad de las mediciones ambientales.

El punto de instalación fue seleccionado en una zona cerca de un ejemplar de Nogal de entre toda el área, evitando los bordes del terreno para reducir la influencia de sombras externas, variaciones locales del microclima y obstáculos que puedan alterar las mediciones del viento o la radiación solar. Esta ubicación permite que los sensores registren condiciones ambientales acordes al entorno real que afecta al cultivo.

La orientación y disposición del nodo en el campo se realizó tomando en cuenta la función específica de cada sensor:

- El sensor de radiación/luz se ubicó protegido y dentro de la caja de acrílico transparente, al ser esta transparente y estar en espacio abierto garantiza su funcionamiento.
- El anemómetro se ubicó en la parte más alta del soporte, garantizando una captación adecuada de la velocidad del viento sin obstáculos.
- El sensor de temperatura/humedad del aire se colocó dentro de la caja de acrílico, pero con la característica de que este está en la carcasa de la caja teniendo contacto directo con el ambiente. En la Figura 27 se aprecia la ubicación del sensor en el costado de la carcasa de la caja de acrílico.
- El sensor de humedad y temperatura del suelo fue instalado directamente en la zona radicular del cultivo, permitiendo registrar directamente la dinámica hídrica del terreno.

Figura 27.

Base de la estructura del Nodo Sensor y vista de la caja de protección de elementos electrónicos



Nota: Fotografía tomada por el autor.

3.7.3. Instalación y protección de componentes electrónicos.

Considerando que el sistema opera en un entorno agrícola expuesto a condiciones climáticas variables, fue necesario implementar medidas específicas para la protección de los componentes electrónicos y del cableado asociado a los sensores.

Los dispositivos electrónicos, incluyendo la Raspberry Pi Zero 2, elementos electrónicos y los módulos de adquisición, fueron alojados en una caja de acrílico que actúa como barrera frente al polvo, la humedad y la exposición directa a agentes externos. Esta caja, además de brindar protección, permite una inspección visual rápida del estado de los componentes sin necesidad de desmontar el sistema e ideal para hacer mantenimiento.

El cableado de los sensores fue organizado y fijado al mástil mediante evitando tensiones mecánicas, desconexiones accidentales y posibles daños por movimiento o vibración.

Asimismo, se dejó holgura suficiente en los cables para facilitar tareas de mantenimiento y reposicionamiento de sensores. Los cables que se conectan a los sensores en la tierra/terreno se pasan por dentro del tubo/mástil asegurando su protección.

Adicionalmente, la presencia del techo y base protectora sobre la estructura reduce la incidencia directa de la radiación solar y la lluvia sobre la caja electrónica, contribuyendo a mantener condiciones térmicas más estables para el funcionamiento de la Raspberry Pi y los módulos electrónicos.

Estas medidas permiten que el sistema opere de forma autónoma y segura durante periodos prolongados, reduciendo la necesidad de intervenciones frecuentes y asegurando la integridad de los datos recolectados.

Figura 28.

Nodo sensor ubicado y funcional en campo



Nota: Fotografía tomada por el autor.

3.8. Diseño de la base de datos

El almacenamiento estructurado de la información constituye un elemento clave dentro de los sistemas IoT orientados al monitoreo ambiental, ya que permite conservar de forma organizada y persistente las mediciones generadas por los nodos sensores. Un diseño adecuado de base de datos facilita la integridad de los registros, la consulta histórica de datos y el procesamiento posterior necesario para la generación de indicadores agroclimáticos, como la evapotranspiración de referencia (ET₀). Estos principios forman parte del diseño de sistemas de bases de datos relacionales, donde la organización lógica de la información y la definición correcta de entidades y atributos garantizan consistencia y eficiencia en el manejo de los datos (Elmasri & Navathe, 2016).

En el sistema implementado, el nodo coordinador recibe de forma continua las publicaciones MQTT enviadas por el nodo sensor y registra cada lectura en una base de datos relacional embebida denominada *sensores_data.db*. Este enfoque responde a la necesidad de contar con un almacenamiento local dentro del propio dispositivo, característica asociada a los modelos de *edge computing*, donde el procesamiento y almacenamiento inicial de los datos se realiza en el borde de la red, reduciendo la dependencia de servidores externos y mejorando la disponibilidad del sistema (Shi et al., 2016).

La base de datos fue implementada utilizando SQLite, un motor de bases de datos relacional ligero que opera sin un servidor independiente y que se integra directamente con la aplicación que lo utiliza. Este tipo de solución es especialmente adecuada para plataformas de recursos limitados, como la Raspberry Pi Zero 2, ya que reduce la sobrecarga de procesos y simplifica la administración del sistema. Además, SQLite cumple con las propiedades ACID (atomicidad, consistencia, aislamiento y durabilidad), lo que garantiza que cada registro de sensor sea almacenado de manera confiable, incluso ante fallos inesperados del sistema (Silberschatz et al., 2019).

La estructura de la base de datos fue diseñada para almacenar, de forma cronológica, las variables ambientales medidas por el nodo sensor: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, precipitación, humedad del suelo y la marca de tiempo correspondiente a cada lectura. Esta organización permite realizar consultas temporales precisas, necesarias tanto para el cálculo automatizado de la ET_0 como para la generación de archivos CSV y la posterior integración con herramientas de visualización como Power BI.

Desde la perspectiva del modelo de referencia IoT propuesto por la UIT, el almacenamiento y gestión de datos dentro del nodo coordinador se ubica en la *capa de apoyo a servicios y aplicaciones*, encargada de recibir, procesar y almacenar la información proveniente de los dispositivos finales antes de su utilización en aplicaciones de análisis y visualización (UIT, 2012b). Esta capa actúa como intermediaria entre la adquisición de datos en campo y su explotación en niveles superiores del sistema.

La elección de SQLite y el diseño relacional adoptado permiten que el sistema sea escalable ante la incorporación futura de nuevos sensores o variables, manteniendo coherencia en la organización de la información y facilitando el mantenimiento del sistema. De esta manera, la base de datos no solo cumple una función de almacenamiento, sino que se convierte en un componente central dentro de la arquitectura IoT implementada.

3.8.1. Modelo conceptual (Entidad-Relación).

El modelo conceptual de una base de datos permite representar de forma abstracta la organización de la información antes de su implementación física. Este modelo se basa en la identificación de entidades, atributos y relaciones, y constituye la primera etapa del diseño de bases de datos relacionales, ya que define la estructura lógica que posteriormente será traducida a tablas dentro del sistema gestor de base de datos (Elmasri & Navathe, 2016).

En el sistema propuesto, el modelo Entidad-Relación (ER) se construye a partir del análisis de las variables ambientales medidas por el nodo sensor y de la necesidad de registrar dichas mediciones de forma cronológica para su posterior procesamiento. El objetivo principal del modelo conceptual es representar cómo se organiza la información generada por los sensores y cómo esta se relaciona con el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0).

A partir de este análisis, se identifican las siguientes entidades principales:

- Lectura ambiental
- Sensor
- Cálculo de ET_0

La entidad *Lectura ambiental* representa el conjunto de datos capturados en un instante de tiempo específico. Esta entidad contiene como atributo fundamental la marca temporal, que permite ordenar cronológicamente las mediciones y constituye el eje principal de organización de la información.

La entidad *Sensor* representa el origen de cada variable ambiental medida. Aunque físicamente los sensores están conectados al mismo nodo, desde el punto de vista conceptual es necesario distinguirlos para comprender la procedencia de cada dato registrado, ya que cada variable responde a un principio de medición distinto (temperatura, humedad, radiación, viento, precipitación y humedad del suelo).

Por su parte, la entidad *Cálculo de ET_0* representa el resultado derivado a partir de las variables almacenadas en cada lectura. Esta entidad no corresponde a una medición directa, sino a un valor calculado por el nodo coordinador a partir de los datos registrados.

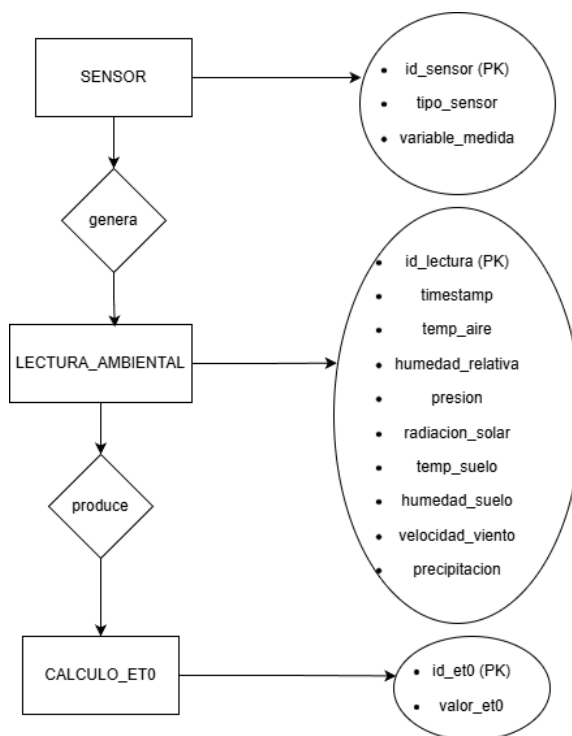
Las relaciones entre estas entidades se establecen de la siguiente manera:

- Un Sensor genera múltiples Lecturas ambientales a lo largo del tiempo (relación uno a muchos).
- Cada Lectura ambiental produce un único Cálculo de ET₀ diario asociado al acumulado de instancias de medición (relación uno a uno).

En la Figura 29 se indica un Diagrama que demuestra la relación que se tiene con las entidades:

Figura 29.

Modelo Entidad-Relación conceptual del sistema de monitoreo ambiental



Nota: Elaboración propia.

Este modelo permite comprender, desde una perspectiva conceptual, que el sistema no solo almacena mediciones, sino que organiza información proveniente de diferentes fuentes (sensores) y genera información derivada (ET₀), manteniendo una estructura lógica clara que facilita su posterior implementación en tablas.

El uso del modelo Entidad-Relación en esta etapa permite asegurar que el diseño de la base de datos mantenga coherencia con el funcionamiento real del sistema, evitando

redundancias y garantizando que cada elemento de información tenga un propósito definido dentro del esquema general (Silberschatz et al., 2019).

3.8.2. Diseño lógico (tablas, relaciones y atributos).

Una vez definido el modelo conceptual mediante el diagrama Entidad-Relación, el siguiente paso en el diseño de la base de datos consiste en traducir dicha representación a un modelo lógico relacional, donde las entidades se transforman en tablas y los atributos en campos claramente definidos. Este proceso permite estructurar la información de forma organizada, garantizando integridad y coherencia en el almacenamiento de los datos (Elmasri & Navathe, 2016).

En el modelo conceptual se identificaron tres entidades principales: Sensor, Lectura ambiental y Cálculo ET₀. Sin embargo, al realizar el diseño lógico, se analiza el comportamiento real del sistema y la forma en que los datos son generados y utilizados. Debido a que todos los sensores se encuentran conectados al mismo nodo físico y que cada lectura corresponde a un conjunto completo de variables medidas en un mismo instante de tiempo, se adopta una estrategia de simplificación estructural que permite consolidar la información en una tabla principal denominada lecturas.

Este criterio responde a principios del diseño relacional aplicados a bases de datos de propósito específico, donde se prioriza la eficiencia en las consultas y la simplicidad del esquema cuando no existen múltiples entidades independientes que requieran normalización avanzada (Silberschatz et al., 2019). En este caso, separar la información en múltiples tablas no aporta beneficios funcionales, ya que todas las variables están asociadas directamente a una misma lectura temporal.

La tabla lecturas representa, por tanto, la materialización lógica de la entidad Lectura ambiental, integrando además el atributo correspondiente al valor calculado de ET₀, que en el modelo conceptual pertenecía a una entidad separada. Desde el punto de vista lógico, este

atributo puede incorporarse en la misma tabla debido a su dependencia directa de cada registro de lectura.

Los atributos definidos para tabla corresponden a cada una de las variables ambientales medidas por los sensores, junto con un identificador único y la marca de tiempo. La relación conceptual entre sensores y lecturas se mantiene implícita a través del significado de cada campo, ya que el nombre del atributo identifica claramente la variable y el sensor del cual proviene la medición. A continuación, en la Tabla 17 está definido la estructura de la base de datos:

Tabla 17.

Estructura de la tabla lecturas de la base de datos sensores_data.db

Campo	Tipo de dato	Descripción
Id	INTEGER (PK)	Identificador único autoincremental
Timestamp	TEXT	Fecha y hora de la lectura
temp_aire	REAL	Temperatura del aire (°C) – BME280
humedad_relativa	REAL	Humedad relativa (%) – BME280
Presión	REAL	Presión atmosférica (hPa) – BME280
radiacion_solar	REAL	Intensidad de luz (lux) – BH1750
temp_suelo	REAL	Temperatura del suelo (°C) – DS18B20
humedad_suelo	REAL	Humedad del suelo (%) – Sensor capacitivo
velocidad_viento	REAL	Velocidad del viento (m/s) – Anemómetro WH-SP-WS01
Precipitación	REAL	Precipitación (mm) – Pluviómetro WH-SP-RG
et0_calculada	REAL	Valor de ET ₀ calculado por el nodo coordinador

Nota: Elaboración propia.

Este diseño lógico permite que cada registro contenga toda la información necesaria para realizar consultas temporales sin necesidad de realizar uniones entre múltiples tablas, lo cual simplifica el acceso a los datos por parte de los procesos del sistema. Asimismo, se mantiene la coherencia con el modelo conceptual previamente definido, garantizando que cada atributo tenga un significado claro dentro de la estructura de la base de datos.

3.8.3. Implementación física (creación y configuración de base de datos).

La implementación física de la base de datos corresponde a la materialización del esquema lógico dentro de un sistema de gestión específico, junto con la configuración que posibilita su operación en el entorno donde se ejecuta la aplicación. En arquitecturas IoT de borde (*edge computing*), dicha implementación requiere soluciones que equilibren eficiencia, portabilidad y bajo consumo de recursos, dada la restricción de hardware de dispositivos como la Raspberry Pi Zero 2 (Lema, 2023).

Para el sistema desarrollado, se emplea SQLite como motor de base de datos relacional embebido. A diferencia de sistemas cliente-servidor, SQLite opera como una biblioteca integrada dentro de la aplicación, lo que elimina la necesidad de configurar un servidor de base de datos independiente y reduce la complejidad de despliegue y mantenimiento. En esta modalidad, el motor de base de datos y los datos residen físicamente en un único archivo que actúa como el repositorio completo de la información local (SQLite for the Edge, 2025).

SQLite destaca por su ligereza y portabilidad, ya que el archivo de la base de datos puede ser copiado y reutilizado sin importar la plataforma, lo cual facilita su empleo en aplicaciones que operan en dispositivos con recursos limitados y donde la gestión de datos se realiza localmente. Estas características son especialmente beneficiosas para aplicaciones de IoT y sistemas embebidos, donde el almacenamiento en el borde permite operaciones autónomas aun cuando la conectividad de red no esté disponible permanentemente.

La creación física de la base de datos en SQLite se logra mediante sentencias de definición de datos ejecutadas desde scripts de Python, específicamente dentro del nodo coordinador. El lenguaje Python incluye la biblioteca estándar `sqlite3`, que permite interactuar directamente con el motor SQLite, ejecutar comandos SQL y gestionar conexiones de forma programática. Esta integración permite crear la base de datos, definir sus tablas y atributos, y

prepararla para recibir datos sin intervención manual, facilitando la automatización del proceso durante la instalación o inicialización del sistema.

La primera etapa de la implementación física es la creación del archivo de base de datos si este no existe. Esto se realiza mediante una conexión inicial en Python que genera el fichero físico en el sistema de archivos. Posteriormente, se ejecuta la sentencia `CREATE TABLE` para definir la estructura de la tabla principal de acuerdo con el diseño lógico establecido, asegurando que los campos y tipos de datos respondan a las necesidades de almacenamiento de las variables ambientales y los valores derivados como la evapotranspiración de referencia (ET_0).

Además de estas definiciones, es recomendable establecer índices en campos que serán objeto frecuente de consultas, como la marca de tiempo (*timestamp*), para mejorar el rendimiento de las operaciones de lectura. SQLite soporta la creación de índices mediante la sentencia `CREATE INDEX`, lo que contribuye a optimizar la eficiencia de las consultas relacionadas con series temporales, un aspecto crítico en sistemas de monitoreo ambiental.

La implementación física local de la base de datos permite que el procesamiento de datos se realice directamente en el nodo coordinador sin depender de la conectividad hacia servidores remotos o servicios en la nube, reduciendo la latencia y mejorando la disponibilidad del sistema. Esta propiedad también facilita que el sistema continúe operando de forma autónoma y robusta frente a interrupciones de red o fallos transitorios, aspectos que son esenciales en aplicaciones de monitoreo continuo en campo.

El Anexo B, indica más a detalle el cómo se establecen las tablas en la base de datos a nivel de código, además de cómo se asigna y asocia con una fecha y hora con los datos arribados la cuál es importante para ordenarlos, filtrarlos y exportarlos posteriormente.

3.9. Estrategias de prueba preliminares

Las estrategias de prueba constituyen una etapa fundamental dentro del proceso de diseño e implementación de sistemas basados en IoT, ya que permiten verificar el correcto funcionamiento de cada componente antes de su operación definitiva en campo. En sistemas que integran hardware, software, comunicación y procesamiento de datos, las pruebas deben realizarse de forma progresiva, iniciando por componentes individuales y avanzando hacia la validación del sistema completo (Pressman & Maxim, 2020b).

En el contexto del sistema desarrollado, las pruebas preliminares permiten garantizar que la adquisición de datos desde los sensores, la transmisión mediante MQTT, el almacenamiento en la base de datos y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (E_{T0}) funcionen de manera correcta antes de su despliegue definitivo en la plantación de nogales. Estas pruebas se estructuran en tres niveles: pruebas unitarias, pruebas de integración y planificación de pruebas del sistema completo.

Este enfoque escalonado responde a las recomendaciones de la ingeniería de software para sistemas embebidos e IoT, donde la verificación progresiva reduce la probabilidad de fallos en etapas posteriores y facilita la detección temprana de errores (Sommerville, 2016).

En la Figura 30 se presenta como son los niveles de pruebas aplicados al proyecto donde se destacan 3 niveles detallados a continuación:

Figura 30.

Niveles de pruebas aplicados al sistema IoT



Nota: Elaboración propia.

3.9.1. Definición de pruebas unitarias.

Las pruebas unitarias constituyen el primer nivel de verificación dentro del proceso de validación de un sistema, y tienen como objetivo comprobar el correcto funcionamiento de cada componente de forma aislada, antes de su integración con otros módulos. Dado que la metodología de desarrollo en V adopta este proyecto, estas pruebas corresponden a la validación de los elementos diseñados en la etapa de definición de componentes, asegurando que cada parte del sistema cumpla con su función específica antes de interactuar con el resto (Sommerville, 2016).

En el sistema de monitoreo implementado, las pruebas unitarias se enfocaron en verificar individualmente el funcionamiento de cada sensor, los scripts de adquisición de datos y los mecanismos básicos de comunicación. Este proceso permitió identificar posibles errores de conexión, lectura incorrecta de variables o configuraciones inadecuadas antes de proceder a la etapa de integración.

Las pruebas unitarias realizadas incluyen:

- Verificación individual de sensores: Cada sensor (BME280, BH1750, DS18B20, anemómetro, pluviómetro y sensor capacitivo de humedad del suelo) fue probado de forma independiente mediante scripts específicos (ver Anexo J), confirmando que las lecturas obtenidas correspondían a valores coherentes con el entorno real.
- Prueba del script de adquisición (*publicador.py*): Se verificó que el script pudiera leer correctamente todas las variables, estructurarlas en formato JSON y ejecutarse de manera continua sin interrupciones.
- Prueba de conectividad MQTT: Se comprobó que el nodo sensor pudiera establecer conexión con el broker HiveMQ Cloud y publicar mensajes correctamente en el tópico configurado.
- Prueba de recepción en el nodo coordinador: Mediante scripts de prueba, se validó que el nodo coordinador recibiera correctamente los mensajes MQTT antes de su almacenamiento en la base de datos.

Estas pruebas permitieron asegurar que cada módulo del sistema funcionara correctamente de manera aislada, reduciendo la posibilidad de errores acumulativos en las etapas posteriores. Este enfoque es coherente con las recomendaciones para pruebas en sistemas IoT y embebidos, donde la verificación progresiva facilita la detección temprana de fallos (Pressman & Maxim, 2020a).

La correcta ejecución de las pruebas unitarias permitió establecer una base confiable para avanzar hacia las pruebas de integración, donde los distintos componentes comienzan a interactuar entre sí dentro de la arquitectura completa del sistema.

3.9.2. Definición de pruebas de integración.

Las pruebas de integración constituyen el segundo nivel dentro de la estrategia de validación del sistema y tienen como propósito verificar el correcto funcionamiento de los

diferentes componentes cuando interactúan entre sí. A diferencia de las pruebas unitarias, donde cada módulo se evalúa de forma aislada, en esta etapa se comprueba que la comunicación, el flujo de datos y la interoperabilidad entre los elementos del sistema se desarrollen de manera adecuada (García, 2018).

En el sistema de monitoreo implementado, las pruebas de integración se enfocaron en validar la interacción entre el nodo sensor, el protocolo de comunicación MQTT, el nodo coordinador y la base de datos SQLite. Este nivel de pruebas permitió asegurar que los datos generados por los sensores no solo fueran correctos de manera individual, sino que pudieran ser transmitidos, recibidos, almacenados y procesados correctamente dentro de la arquitectura IoT planteada.

Las principales pruebas de integración realizadas fueron:

- Integración nodo sensor – broker MQTT: Se verificó que el nodo sensor pudiera publicar continuamente los datos al broker HiveMQ Cloud sin pérdidas de conexión ni errores de transmisión.
- Integración broker MQTT – nodo coordinador: Se comprobó que el nodo coordinador recibiera los mensajes publicados y que el tópico configurado fuera el adecuado para la recepción de datos.
- Integración nodo coordinador – base de datos: Se validó que cada mensaje recibido fuera correctamente insertado como un registro en la tabla *lecturas* de la base de datos.
- Integración base de datos – cálculo de ET_o: Se comprobó que, una vez almacenadas las variables ambientales, el sistema pudiera ejecutar el cálculo de evapotranspiración utilizando esos datos sin generar inconsistencias.
- Integración base de datos – generación de CSV: Se verificó que el script encargado de generar el archivo CSV pudiera consultar la base de datos y producir correctamente el archivo utilizado por Power BI.

Estas pruebas permitieron validar el flujo completo de información dentro del sistema, desde la adquisición de datos hasta su almacenamiento y procesamiento, demostrando que los distintos módulos no solo funcionan correctamente de forma aislada, sino también de manera conjunta dentro de la arquitectura definida. En la Tabla 18 se presenta un resumen de pruebas de integración realizadas donde se destaca la relación de los distintos elementos y su validación con el método de prueba para garantizar el funcionamiento de cada uno derivando cada proceso en el siguiente:

Tabla 18.

Resumen de pruebas de integración

Integración evaluada	Método de prueba	Resultado esperado	Resultado obtenido
Nodo sensor – MQTT	Publicación continua	Sin pérdidas de conexión	Correcto
MQTT – Nodo coordinador	Recepción de mensajes	Datos recibidos correctamente	Correcto
Nodo coordinador – SQLite	Inserción de registros	Registros almacenados	Correcto
SQLite – cálculo ET ₀	Ejecución automática	ET ₀ calculada sin errores	Correcto
SQLite – CSV	Generación de archivo	CSV generado correctamente	Correcto

Nota: Elaboración Propia.

3.9.3. Planificación preliminar de pruebas del sistema

Las pruebas del sistema corresponden al nivel más alto dentro de la estrategia de validación y tienen como objetivo verificar el funcionamiento integral de la solución en condiciones reales de operación. Según la metodología en V adoptada, estas pruebas se asocian con la validación del diseño global del sistema, comprobando que todos los componentes trabajen de manera conjunta para cumplir con los objetivos planteados (INTECO, 2017).

A diferencia de las pruebas unitarias y de integración, que se realizaron en entornos controlados y con componentes específicos, las pruebas del sistema se planifican para ejecutarse directamente en el entorno real de la plantación de nogales, donde intervienen

factores ambientales, condiciones de conectividad y variaciones naturales propias del campo agrícola.

La planificación preliminar de estas pruebas considera verificar los siguientes aspectos durante la etapa descrita en el Capítulo IV:

- Funcionamiento continuo del nodo sensor en condiciones ambientales reales.
- Transmisión estable de datos hacia el broker MQTT durante periodos prolongados.
- Recepción y almacenamiento ininterrumpido de registros en la base de datos del nodo coordinador.
- Correcto cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de datos reales.
- Generación automática de archivos CSV para su visualización en Power BI.
- Coherencia de las variables medidas con las condiciones climáticas observadas en campo.

Estas pruebas permitirán evaluar el comportamiento del sistema como un todo, validando su robustez, confiabilidad y capacidad de operación autónoma durante intervalos prolongados de tiempo. Además, permitirán identificar posibles ajustes necesarios en la ubicación física de los sensores, tiempos de muestreo o configuraciones de comunicación.

La planificación de estas pruebas asegura que el sistema no solo funcione correctamente desde el punto de vista técnico, sino que también cumpla con el propósito para el cual fue diseñado: proporcionar información ambiental confiable para el análisis de la evapotranspiración en la plantación de nogales.

Tabla 19.*Plan preliminar de pruebas del sistema en campo*

Aspecto a evaluar	Método de evaluación	Indicador esperado
Funcionamiento del nodo sensor	Monitoreo continuo en campo	Lecturas constantes sin interrupción
Transmisión MQTT	Supervisión de conexión prolongada	Sin pérdidas de datos
Almacenamiento en base de datos	Revisión de registros almacenados	Registros completos y ordenados
Cálculo de ET ₀	Comparación con datos esperados	Valores coherentes
Generación de CSV	Revisión del archivo generado	Datos completos y correctos

Nota: Elaboración Propia

3.10. Consideraciones adicionales

Además del diseño e implementación técnica del sistema, es necesario considerar aspectos relacionados con su operación a largo plazo en un entorno real. Estas consideraciones permiten evaluar la viabilidad del sistema más allá de su funcionamiento inmediato, contemplando factores como el mantenimiento, la sostenibilidad y las acciones a tomar ante posibles fallos. Incluir estos criterios dentro del diseño fortalece la propuesta, ya que demuestra que el sistema no solo fue concebido para funcionar correctamente, sino también para mantenerse operativo de forma estable en el tiempo.

3.10.1. Consideraciones sobre mantenimiento y sostenibilidad del sistema.

El sistema desarrollado está orientado a operar de forma continua en un entorno agrícola, por lo que es necesario considerar aspectos relacionados con su mantenimiento y sostenibilidad a lo largo del tiempo. Estas consideraciones permiten garantizar que el sistema pueda mantenerse operativo sin requerir intervenciones complejas o frecuentes.

En primer lugar, el uso de componentes ampliamente documentados y de bajo consumo energético, como la Raspberry Pi Zero 2 y sensores comerciales de fácil reposición, facilita el mantenimiento físico del sistema. En caso de fallo de algún sensor, su reemplazo no implica

modificaciones en la arquitectura general ni en la lógica del sistema, ya que cada variable es leída de forma independiente por los scripts definidos (Anexo J).

Asimismo, la organización modular del software, donde cada script cumple una función específica (adquisición, almacenamiento, cálculo y exportación de datos), permite realizar ajustes o correcciones sin afectar el funcionamiento total del sistema. Esta modularidad favorece la sostenibilidad del proyecto, ya que posibilita la actualización de partes del sistema sin necesidad de rediseñar la solución completa.

Desde el punto de vista del almacenamiento, el uso de una base de datos SQLite en un único archivo simplifica las tareas de respaldo y recuperación de información, lo cual contribuye a la continuidad operativa del sistema ante posibles fallos.

Finalmente, la automatización de procesos mediante tareas programadas (*cron*) permite que el sistema funcione de manera autónoma, reduciendo la necesidad de supervisión constante y favoreciendo su operación prolongada en campo.

3.10.2. Estrategias de respaldo y contingencia.

En sistemas de monitoreo continuo es necesario prever mecanismos que permitan proteger la información generada y asegurar la continuidad operativa ante posibles fallos. En este proyecto, las estrategias de respaldo y contingencia se centran en la protección de la base de datos, la recuperación del software y la reposición de componentes físicos.

La base de datos (*sensores_data.db*) se almacena como un único archivo dentro del nodo coordinador, lo que facilita la generación de copias de seguridad periódicas. Este archivo puede ser respaldado manualmente o mediante tareas programadas, permitiendo su restauración inmediata en caso de fallo del sistema operativo, corrupción de datos o reemplazo del dispositivo.

Desde el punto de vista del software, todos los scripts utilizados en el sistema se encuentran organizados y documentados (Anexos A, B, C, D, E, F, G, I, L, M, Q), lo que

permite reinstalar rápidamente el entorno de trabajo en una nueva Raspberry Pi en caso de daño del equipo. La utilización de entornos virtuales y librerías estándar de Python simplifica este proceso, ya que la configuración puede reproducirse de manera controlada.

En cuanto a la contingencia de hardware, el uso de sensores comerciales y de bajo costo facilita su reemplazo inmediato en caso de avería, sin necesidad de realizar ajustes en el diseño del sistema. Además, la separación entre nodo sensor y nodo coordinador permite que un fallo en uno de ellos no comprometa totalmente la información ya almacenada.

Estas estrategias permiten garantizar que, ante fallos previsibles en entornos de campo, el sistema pueda ser restaurado en un tiempo reducido y sin pérdida significativa de información, asegurando la continuidad del monitoreo ambiental.

4. CAPITULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas al sistema de monitoreo en condiciones reales de operación, así como el análisis de los datos obtenidos durante el periodo de evaluación en la plantación de nogales de la Granja Experimental Yuyucocha. A diferencia del capítulo anterior, donde se describió el diseño e implementación del sistema, en este apartado se evidencia su funcionamiento práctico, verificando la adquisición, transmisión, almacenamiento y procesamiento de la información ambiental.

Las pruebas desarrolladas permiten validar el comportamiento integral del prototipo, comprobando que los datos generados por los sensores son registrados correctamente, utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y posteriormente analizados mediante herramientas de visualización. De esta manera, se demuestra la factibilidad del sistema propuesto para el monitoreo ambiental aplicado al cultivo de nogales.

4.1. Descripción del entorno de pruebas en campo

Para validar el funcionamiento real del sistema de monitoreo, las pruebas se realizaron directamente en la plantación de nogales de la Granja Experimental Yuyucocha, donde el sistema fue instalado en condiciones reales de operación. Este entorno permitió evaluar el comportamiento del prototipo frente a factores ambientales propios del campo, tales como variaciones de temperatura, humedad, radiación solar, viento y precipitaciones.

El nodo sensor fue ubicado en una zona representativa del cultivo, considerando la cercanía a los árboles evaluados y la exposición directa a las condiciones climáticas. Por su parte, el nodo coordinador se lo tiene a la mano ya que es portable y depende solo de la conexión a Internet y energía, permitiendo la recepción y almacenamiento continuo de los datos enviados mediante MQTT.

Este escenario de pruebas permitió verificar que el sistema no solo funcionara en un entorno controlado, sino que operara correctamente en el contexto real para el cual fue diseñado.

Figura 31.

Entorno-plantación nogales



Nota: Fotografía tomada por el autor.

4.1.1. Ubicación del sistema en la plantación de nogales

El nodo sensor fue instalado en un punto estratégico dentro de la plantación de nogales, procurando que su ubicación permita captar de manera representativa las condiciones ambientales que influyen directamente en el cultivo. La selección del lugar consideró la exposición a radiación solar, circulación de viento y cercanía a los árboles evaluados, garantizando que las variables medidas correspondan al entorno real del cultivo.

Los sensores se dispusieron de forma que cada uno pudiera operar sin interferencias físicas, asegurando lecturas confiables de temperatura, humedad, radiación, viento, precipitación y condiciones del suelo. La estructura de montaje permitió proteger los

componentes electrónicos, al mismo tiempo que mantiene los sensores expuestos al ambiente según sus requerimientos de medición.

Como se observa en la Figura 32, el sistema se encuentra integrado directamente en el entorno del cultivo, lo que permite que las mediciones obtenidas reflejen fielmente las condiciones climáticas presentes en la zona de estudio.

Figura 32.

Disposición física del nodo sensor y los sensores ambientales en la plantación de nogales



Nota: Fotografía tomada por el autor.

4.1.2. Periodo de recolección de datos

El sistema de monitoreo fue configurado para operar de manera continua durante un periodo definido de evaluación, con el objetivo de obtener un conjunto representativo de datos ambientales en condiciones reales de campo. Durante este periodo, el nodo sensor realizó la adquisición de variables ambientales con una frecuencia de muestreo constante, permitiendo la generación de un histórico de datos suficiente para su posterior análisis.

La recolección de datos se llevó a cabo durante varios días consecutivos, lo que permitió observar el comportamiento del sistema frente a variaciones diurnas y nocturnas de las condiciones climáticas. Este enfoque es importante, ya que variables como la temperatura, la radiación solar y la humedad presentan cambios significativos a lo largo del día, los cuales influyen directamente en el cálculo de la ET_0 .

El periodo seleccionado permitió verificar la estabilidad del sistema, tanto en la adquisición de datos como en la transmisión, almacenamiento y procesamiento de la información. Asimismo, facilitó la obtención de un volumen de datos adecuado para evaluar el desempeño del prototipo y su capacidad para operar de forma autónoma durante intervalos prolongados.

Como se resume en la Tabla 20, se detalla el intervalo temporal durante el cual el sistema permaneció en funcionamiento continuo para la realización de las pruebas. Cabe resaltar a nivel de programa si bien el intervalo de muestreo es cada 5 minutos se entiende que hay un total de 12 registros por hora, se toma el valor promedio o suma dependiendo la variable medida para en base a esos registros ejecutar un valor de media cada hora, es decir, se obtiene 24 registros por día derivados de los 12 registros por hora que se obtiene directo de los registros de intervalo.

Tabla 20.

Periodo y frecuencia de recolección de datos

Parámetro	Valor
Fecha de inicio de pruebas	1 de enero del 2026
Fecha de fin de pruebas	31 de enero del 2026
Intervalo de muestreo	5 minutos
Registros por hora	12
Registros por día	24

Nota: Elaboración propia.

Según el total de registros proporcionados en el periodo de prueba y la frecuencia de esta se identifica que hay un total aproximado de 288 registros al día los cuales permiten hacer

un promedio de las horas de los distintos valores censados. Estos generan un valor único al día el cual permite realizar el cálculo de ET_0 diaria de forma precisa.

4.1.3. Condiciones ambientales durante las pruebas

Durante el periodo de evaluación, el sistema operó bajo condiciones ambientales reales propias de la plantación de nogales, lo que permitió verificar su desempeño frente a variaciones naturales de temperatura, humedad, radiación solar, viento y precipitaciones. Estas variaciones son relevantes, ya que influyen directamente en el comportamiento de los sensores y en el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

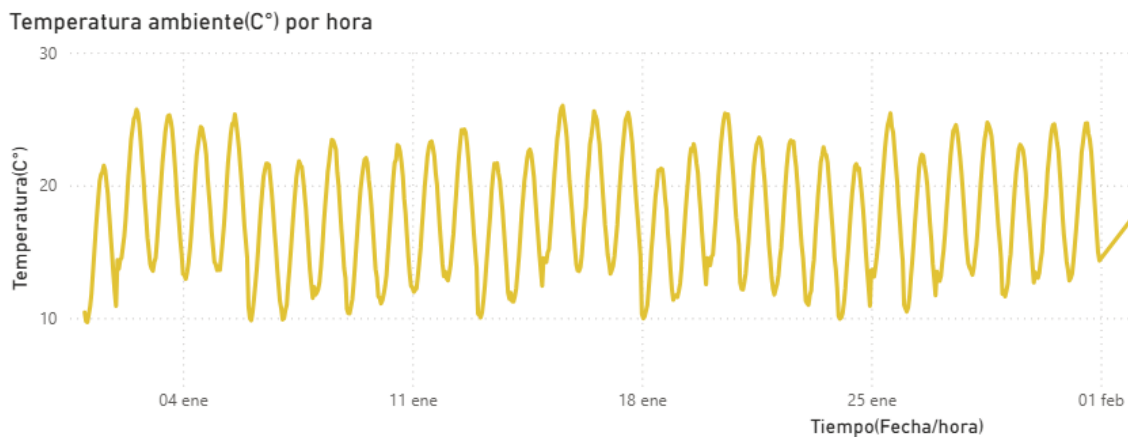
Las pruebas se desarrollaron en jornadas con presencia de ciclos térmicos diarios marcados, donde se evidenciaron incrementos de temperatura y radiación solar durante el día, y descensos durante la noche. Asimismo, se registraron cambios en la humedad relativa y eventos de viento y precipitación que permitieron comprobar la respuesta del sistema ante diferentes escenarios climáticos.

Estas condiciones permitieron validar que las lecturas obtenidas por los sensores correspondan a variaciones reales del entorno, y que el sistema sea capaz de registrar adecuadamente dichos cambios sin interrupciones. Además, proporcionaron un conjunto de datos diverso que facilita el análisis posterior del comportamiento de la ET_0 frente a distintos escenarios ambientales.

En la Figura 33 se presenta un ejemplo de las variaciones registradas en algunas de las variables ambientales durante el periodo de pruebas, evidenciando el comportamiento dinámico del entorno monitoreado.

Figura 33.

Ejemplo de variación de variables ambientales (temperatura ambiente) durante el periodo de pruebas tomado de Power BI



Nota: Elaboración propia tomada de Power BI.

4.2. Recolección y registro de datos ambientales

Una vez instalado el sistema en campo y definido el periodo de evaluación, se procedió a la recolección continua de las variables ambientales mediante el nodo sensor. Cada lectura fue enviada al nodo coordinador a través del protocolo MQTT y almacenada en la base de datos SQLite, generando un registro cronológico de las condiciones ambientales presentes en la plantación de nogales.

Este proceso permitió obtener un conjunto de datos estructurado que refleja el comportamiento real de las variables medidas durante el periodo de pruebas. La frecuencia de muestreo establecida permitió registrar cambios progresivos en temperatura, humedad, radiación solar, viento, precipitación y condiciones del suelo, proporcionando información suficiente para el análisis posterior del sistema y del cálculo de la evapotranspiración.

La correcta operación del sistema durante este periodo se evidencia en la cantidad de registros almacenados, los cuales se generaron de forma automática sin intervención manual.

Como se muestra en la Figura 34, la base de datos contiene una secuencia continua de lecturas que demuestran el funcionamiento estable del sistema de monitoreo.

Figura 34.

Ejemplo de registros almacenados en la base de datos (archivo csv) durante el periodo de pruebas

hora	fecha	T_media_hora	HR_media_ho	presion_med	rad_global_me	viento_medio	lluvia_mm_hoi	T_suelo_med	H_suelo_med	lluvia_mm_dia	ET0_mm_dia
01/01/2026 00:00	01/01/2026	10.41	87.64	784.02	0.01	0.84	0	8.63	44.07	0	7.195
01/01/2026 01:00	01/01/2026	9.75	90.25	784.02	0.01	0.84	0	8.43	43.71	0	7.195
01/01/2026 02:00	01/01/2026	9.68	89.24	783.69	0.01	0.75	0	8.55	43.34	0	7.195
01/01/2026 03:00	01/01/2026	10.27	88.23	783.71	0.01	0.81	0	8.77	42.96	0	7.195
01/01/2026 04:00	01/01/2026	10.85	86.52	783.94	0.01	0.7	0	8.53	42.55	0	7.195
01/01/2026 05:00	01/01/2026	11.85	83.01	784.57	0.01	0.57	0	8.4	42.17	0	7.195
01/01/2026 06:00	01/01/2026	13.35	78	784.14	13.5	0.48	0	8.26	41.75	0	7.195
01/01/2026 07:00	01/01/2026	14.85	74.41	784.02	37.74	0.49	0	8.82	41.29	0	7.195
01/01/2026 08:00	01/01/2026	16.42	70.64	783.9	111.73	1.3	0	9.58	40.82	0	7.195
01/01/2026 09:00	01/01/2026	17.79	66.72	783.74	206.12	1.37	0	10.62	40.26	0	7.195
01/01/2026 10:00	01/01/2026	19.09	61.71	783.63	349.56	1.53	0	11.99	39.68	0	7.195
01/01/2026 11:00	01/01/2026	20.32	58.96	784.25	483.9	1.39	0	13.37	38.99	0	7.195
01/01/2026 12:00	01/01/2026	20.82	57.65	784.14	532.07	1.7	0	14.86	38.21	0	7.195
01/01/2026 13:00	01/01/2026	21	57.23	783.82	486.65	1.24	0	16.36	37.44	0	7.195
01/01/2026 14:00	01/01/2026	21.49	55.92	783.93	358.69	1.85	0	17.43	36.74	0	7.195
01/01/2026 15:00	01/01/2026	21.16	56.11	783.59	221.08	0.91	0	18.24	36.06	0	7.195
01/01/2026 16:00	01/01/2026	20.24	58.91	783.83	86.9	1.33	0	18.88	35.36	0	7.195
01/01/2026 17:00	01/01/2026	19.33	61	783.66	50.67	1.68	0	19.6	34.75	0	7.195
01/01/2026 18:00	01/01/2026	17.8	65.53	783.71	15.53	1.44	0	19.71	34.24	0	7.195
01/01/2026 19:00	01/01/2026	16.29	70.48	784.34	0.01	0.54	0	19.48	33.69	0	7.195
01/01/2026 20:00	01/01/2026	14.89	74.68	784.11	0.02	0.68	0	18.46	33.2	0	7.195
01/01/2026 21:00	01/01/2026	13.33	79.47	783.66	0.01	0.74	0	17.19	32.79	0	7.195
01/01/2026 22:00	01/01/2026	11.98	83	783.9	0.01	0.73	0	15.97	32.43	0	7.195
01/01/2026 23:00	01/01/2026	10.9	86.15	783.83	0.01	0.69	0	14.73	32.08	0	7.195
02/01/2026 00:00	02/01/2026	14.37	82.77	784.14	0.01	1.04	0	13.49	31.66	0	7.918

Nota: Tabla obtenida a partir del csv generado del nodo coordinador tomado de ejemplo del 1 de enero del 2026.

4.2.1. Frecuencia de muestreo y volumen de datos generados

El nodo sensor fue configurado para realizar lecturas ambientales con una frecuencia de muestreo constante de cinco minutos. Esta periodicidad permitió capturar de forma detallada las variaciones de las condiciones climáticas a lo largo del día, generando una base de datos suficientemente densa para el análisis del comportamiento de las variables medidas y su relación con la evapotranspiración.

Durante el periodo de pruebas, esta frecuencia de muestreo produjo un volumen considerable de registros almacenados en la base de datos, evidenciando la capacidad del sistema para operar de manera continua y automática. La acumulación de datos en intervalos

regulares demuestra que no existieron interrupciones en la adquisición, transmisión ni almacenamiento de la información.

Según la Tabla 20 se destaca que hay un total de 24 registros diarios (cada hora 1 registro) y dado el periodo de tiempo de recolección de muestras de 31 días tiene un aproximado de 744 volumen de datos. Hay que tomar en cuenta que cada día se realiza el cálculo de ET_0 donde toma dependiendo las variables un promedio o la suma de datos en el día para realizar el cálculo pertinente.

4.2.2. Estructura de los registros almacenados en la base de datos

Cada lectura generada por el nodo sensor es almacenada en la base de datos como un registro que contiene todas las variables ambientales medidas en un instante de tiempo específico. Esta estructura permite que cada fila de la tabla *lecturas* represente un conjunto completo de información correspondiente a una medición puntual del entorno.

La organización de los datos en esta forma facilita la consulta cronológica de las variables y simplifica el acceso a la información necesaria para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0). Además, permite que los scripts encargados del procesamiento y exportación de datos puedan trabajar directamente sobre la base de datos sin requerir transformaciones adicionales. La Tabla 21 explica la estructura de la tabla *lecturas* y como está distribuida:

Tabla 21.*Estructura de los registros almacenados en la base de datos durante las pruebas*

Campo	Tipo de dato	Unidad	Descripción
timestamp	TEXT	Fecha-hora	Marca temporal exacta en la que se registró la lectura del conjunto de sensores.
temperatura	REAL	°C	Temperatura del aire medida por el sensor ambiental.
humedad	REAL	%	Humedad relativa del aire en el instante de la medición.
Presión	REAL	hPa	Presión atmosférica registrada.
Lux	REAL	lux	Intensidad luminosa captada por el sensor, posteriormente convertida a radiación solar.
temperatura_suelo	REAL	°C	Temperatura del suelo medida a nivel radicular del nogal.
humedad_suelo	REAL	%	Contenido de humedad del suelo alrededor del sistema radicular.
vel_viento	REAL	m/s	Velocidad del viento medida por el anemómetro.
Lluvia	INTEGER	pulsos / mm	Conteo de pulsos del pluviómetro, equivalente a precipitación registrada.
et0	REAL	mm/día	Valor de evapotranspiración de referencia calculado para el día correspondiente.

Nota: Elaboración propia.

4.3. Verificación del cálculo de evapotranspiración (ET₀)

Una vez verificado que el sistema recolecta y almacena correctamente las variables ambientales, el siguiente paso consiste en comprobar el correcto funcionamiento del cálculo de la ET₀ realizado por el nodo coordinador. Este cálculo se ejecuta automáticamente a partir de los datos almacenados en la base de datos y constituye uno de los objetivos principales del sistema desarrollado.

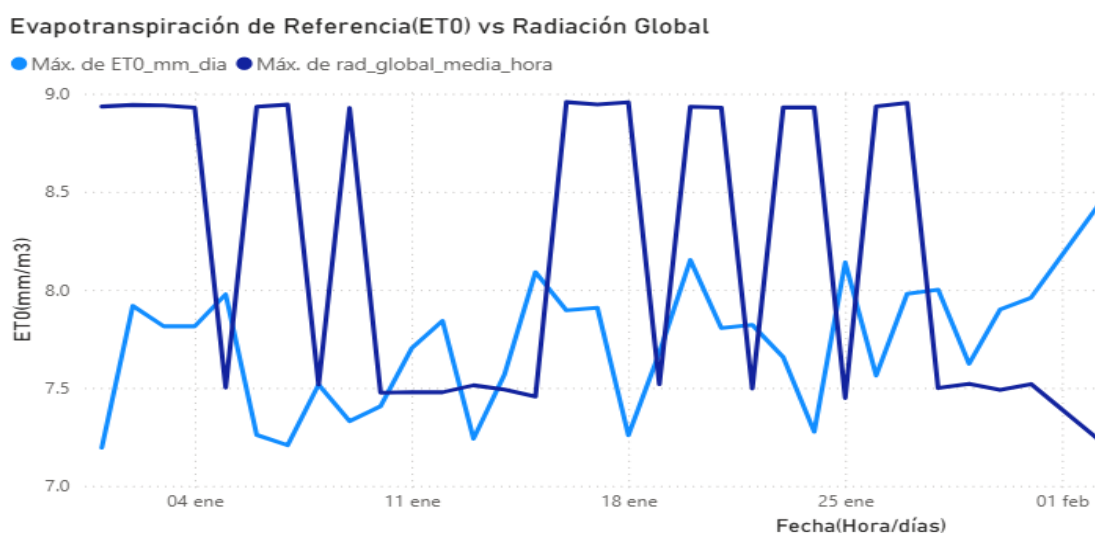
El valor de ET₀ depende directamente de variables como temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Por esta razón, el análisis de los resultados obtenidos permite verificar que el cálculo responde de forma coherente a las variaciones ambientales registradas durante el periodo de pruebas.

Durante la evaluación, se observó que los valores de ET₀ presentan incrementos en intervalos donde la radiación solar y la temperatura son más elevadas, y disminuyen durante

periodos nocturnos o de baja radiación. Este comportamiento confirma que el cálculo implementado en el script del nodo coordinador responde adecuadamente a las condiciones ambientales reales. La Figura 35 indica la relación entre la evapotranspiración y la radiación solar durante el periodo de pruebas, se rescata que hay picos más altos del índice de radiación en función de la variable censada que es la radiación solar donde se evidencia que en días y horarios con más índice de radiación solar existe un valor mucho más alto de ET_0 y cuando hay caídas en el índice de radiación solar por lo general en las noches la ET_0 también debido a que la radiación es una de las variables y factores que afectan directamente proporcional a determinar la ET_0 según el Modelo de Cálculo de Penman-Monteith FAO-56 implementada.

Figura 35.

Comportamiento de la evapotranspiración calculada durante el periodo de pruebas tomada de Power BI



Nota: Elaboración Propia tomada de Power BI.

4.3.1. Variables utilizadas en el cálculo

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) implementado en el sistema se basa en las variables ambientales registradas por el nodo sensor y almacenadas en la base de datos. Estas variables corresponden a los parámetros requeridos por el modelo de Penman-

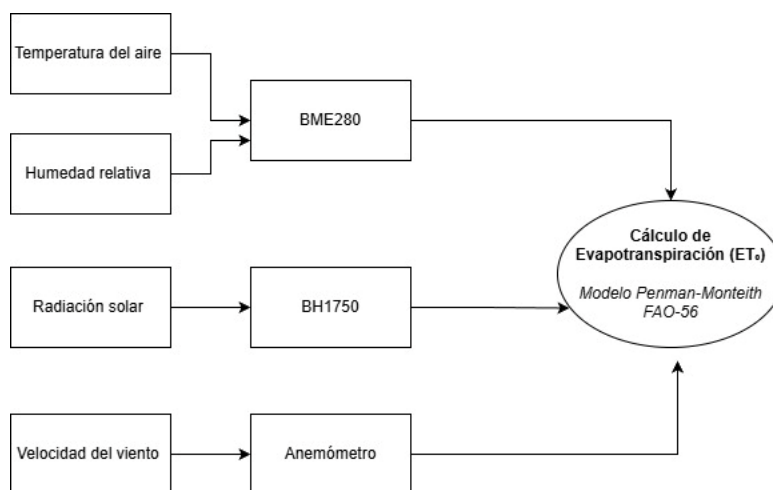
Monteith FAO-56, el cual establece que la ET_0 depende principalmente de la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento.

En el sistema desarrollado, estas variables son medidas por sensores específicos: el BME280 proporciona temperatura, humedad relativa y presión atmosférica; el BH1750 registra la radiación solar en forma de intensidad lumínica; y el anemómetro WH-SP-WS01 mide la velocidad del viento. Estas lecturas permiten que el script del nodo coordinador disponga de la información necesaria para ejecutar el cálculo de forma automática cada vez que se registra una nueva lectura.

La relación entre estas variables y el cálculo de la ET_0 se puede observar en la Figura 36, donde se presenta la correspondencia entre las mediciones ambientales y su uso dentro del algoritmo implementado.

Figura 36.

Relaciones variables medidas-sensores para determinación de ET_0



Nota: Elaboración propia.

4.3.2. Ejemplos de valores calculados de ET_0

Durante el periodo de pruebas, el sistema generó de forma automática valores de evapotranspiración de referencia (ET_0) asociados a cada registro ambiental almacenado en la base de datos. Estos valores permiten evidenciar que el cálculo implementado en el nodo

coordinador se ejecuta correctamente y responde a las variaciones reales de las condiciones climáticas.

El análisis de estos datos muestra que los valores de ET_0 presentan incrementos durante las horas de mayor radiación solar y temperatura, mientras que disminuyen durante la noche o en momentos de menor incidencia solar. Este comportamiento es coherente con el modelo de Penman-Monteith, el cual establece una relación directa entre estas variables y la demanda evaporativa del ambiente.

En la Figura 37 se presentan algunos ejemplos de valores reales de ET_0 obtenidos durante el periodo de evaluación, junto con las variables ambientales asociadas a cada lectura durante 3 días. Se destaca que el valor de ET_0 es el mismo en todos los registros del día ya que a nivel de código este valor es calculado 1 sola vez al día en función de todos los registros del día y se la asocia a estas.

Figura 37.

Ejemplos de valores de evapotranspiración calculados a partir de los datos ambientales.

hora	fecha	T_media_hora	HR_media_hora	presion_media_hora	rad_global_media_hora	viento_medio_h	lluvia_mi	T_suelo_media_hora	H_suelo_med	lluvia_mm_dia	ET0_mm_dia	
09:00:00 p. m.	viernes, 2 de enero de 2026	17.63	71.96	783.62	0.01	0.6	0	21.81	18	0	7.918	
10:00:00 p. m.	viernes, 2 de enero de 2026	16.04	77.24	784.27	0.01	0.56	0	20.55	18	0	7.918	
11:00:00 p. m.	viernes, 2 de enero de 2026	15.1	80.33	783.71	0.01	0.75	0	19.05	18	0	7.918	
12:00:00 a. m.	sábado, 3 de enero de 2026	14.08	84.45	784.06	0.01	0.75	0	17.62	18	0	7.814	
01:00:00 a. m.	sábado, 3 de enero de 2026	13.72	86.14	784.19	0.01	0.59	0	16.08	18	0	7.814	
02:00:00 a. m.	sábado, 3 de enero de 2026	13.55	86.39	784.2	0.01	0.56	0	14.8	18	0	7.814	
03:00:00 a. m.	sábado, 3 de enero de 2026	14.21	85.38	783.92	0.01	0.86	0	13.63	18	0	7.814	
04:00:00 a. m.	sábado, 3 de enero de 2026	14.55	83.5	783.96	0.01	0.87	0	12.77	18	0	7.814	
05:00:00 a. m.	sábado, 3 de enero de 2026	15.79	80.39	85.38	784.13	0.01	0.75	0	12.3	18	0	7.814
07:00:00 p. m.	sábado, 3 de enero de 2026	20.18	67.73	783.6	0.01	0.65	0	23.08	18	0	7.814	
08:00:00 p. m.	sábado, 3 de enero de 2026	18.53	73.48	784.25	0.01	0.98	0	22.3	18	0	7.814	
09:00:00 p. m.	sábado, 3 de enero de 2026	17.3	77.12	784.22	0.01	0.64	0	21.39	18	0	7.814	
10:00:00 p. m.	sábado, 3 de enero de 2026	15.92	80.52	784.26	0.01	0.71	0	20.21	18	0	7.814	
11:00:00 p. m.	sábado, 3 de enero de 2026	14.84	81.9	784.05	0.01	0.69	0	18.46	18	0	7.814	
07:00:00 p. m.	lunes, 12 de enero de 2026	19.26	62.7	783.75	0.01	0.73	0	22.33	18	0	7.842	
08:00:00 p. m.	lunes, 12 de enero de 2026	17.86	65.79	784.09	0.01	0.93	0	21.32	18	0	7.842	
09:00:00 p. m.	lunes, 12 de enero de 2026	16.34	71.06	784.21	0.01	0.8	0	20.27	18	0	7.842	
10:00:00 p. m.	lunes, 12 de enero de 2026	14.99	74.56	783.69	0.01	0.92	0	19.12	18	0	7.842	
11:00:00 p. m.	lunes, 12 de enero de 2026	13.81	78.55	783.97	0.01	0.73	0	17.58	18	0	7.842	
12:00:00 a. m.	martes, 13 de enero de 2026	10.32	91.7	784.21	0.01	0.77	0	16.07	18	0	7.241	
01:00:00 a. m.	martes, 13 de enero de 2026	10.23	92.57	784.06	0.01	0.74	0	14.82	18	0	7.241	
02:00:00 a. m.	martes, 13 de enero de 2026	10.05	93.36	784.25	0.01	0.85	0	13.69	18	0	7.241	
03:00:00 a. m.	martes, 13 de enero de 2026	10.43	92.7	783.92	0.01	1.01	0	11.47	18	0	7.241	
04:00:00 a. m.	martes, 13 de enero de 2026	11.33	89.48	784.18	0.01	0.67	0	9.7	18	0	7.241	
05:00:00 a. m.	martes, 13 de enero de 2026	12.38	86.24	783.26	0.01	0.65	0	8.96	18	0	7.241	
07:00:00 p. m.	martes, 13 de enero de 2026	16.63	74.67	783.9	0.01	0.66	0	19.27	18	0	7.241	
08:00:00 p. m.	martes, 13 de enero de 2026	15.13	77.11	784.09	0.01	0.81	0	18.56	18	0	7.241	

Nota: Tomado y elaborado desde Power BI.

4.3.3. *Análisis de coherencia entre variables ambientales y ET_0*

El análisis conjunto de las variables ambientales registradas y los valores calculados de evapotranspiración de referencia (ET_0) permite verificar la coherencia del funcionamiento del sistema en condiciones reales. Al comparar estas variables a lo largo del tiempo, se observa que el comportamiento de la ET_0 guarda relación directa con los cambios en temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento.

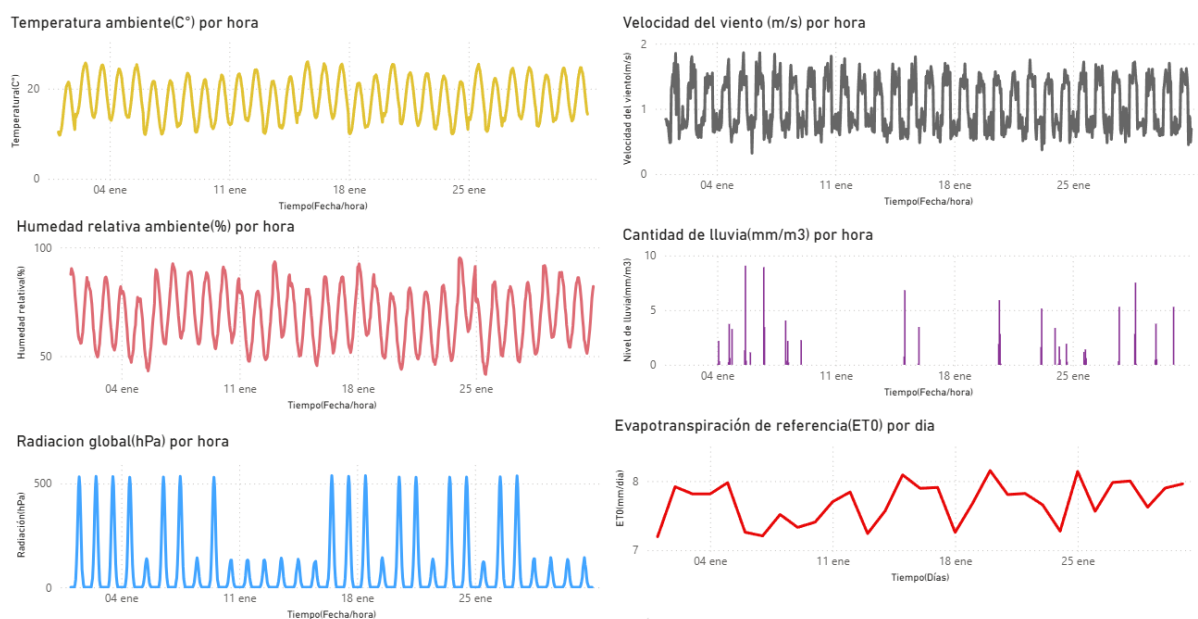
Durante las horas de mayor radiación y temperatura, los valores de ET_0 presentan incrementos progresivos, evidenciando una mayor demanda evaporativa del ambiente. De manera similar, en periodos nocturnos o con baja radiación, se observa una disminución de estos valores, lo cual corresponde al comportamiento esperado según el modelo de Penman-Monteith.

Este análisis confirma que el cálculo implementado en el nodo coordinador responde de manera adecuada a las condiciones ambientales medidas por los sensores, demostrando que la integración entre adquisición de datos y procesamiento es coherente y funcional.

Como se aprecia en la Figura 38 al comparar las variables ambientales con la ET_0 calculada, se evidencia visualmente la relación directa entre estas magnitudes a lo largo del periodo de pruebas.

Figura 38.

Relación observada entre variables ambientales registradas y la evapotranspiración calculada



Nota: Elaboración propia tomada de Power BI.

4.4. Visualización y análisis histórico en Power BI

Una vez verificado el registro correcto de las variables ambientales y el cálculo de la ET_0 , se procede a analizar la información generada mediante herramientas de visualización de datos. Para este propósito se utilizó Microsoft Power BI, alimentado automáticamente a partir del archivo CSV generado por el nodo coordinador desde la base de datos SQLite.

La visualización gráfica permite identificar patrones diarios, tendencias y relaciones entre las variables medidas en campo, facilitando la interpretación del comportamiento del entorno y su influencia directa en el cálculo de la ET_0 .

A continuación, se describe la estructura del panel implementado y el análisis realizado sobre las variables registradas.

4.4.1. Estructura del panel de visualización

El panel de visualización fue diseñado en Microsoft Power BI utilizando como fuente de datos el archivo CSV único generado automáticamente por el nodo coordinador a partir de la base de datos SQLite. Este archivo contiene los valores promedio horarios de las variables ambientales medidas y el cálculo diario de la ET_0 , permitiendo un análisis temporal organizado.

El panel se estructura en dos páginas principales:

- Página 1: visualización individual del comportamiento horario de las variables ambientales registradas, tales como temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, precipitación, temperatura del suelo y humedad del suelo.
- Página 2: visualización de relaciones entre variables mediante gráficos comparativos (VS), así como la representación del valor diario de ET_0 y la precipitación acumulada.

Adicionalmente, el panel incorpora un segmentador de fecha que permite filtrar la información por días específicos, facilitando el análisis detallado del comportamiento ambiental en periodos concretos del registro.

Esta estructura permite observar tanto el comportamiento individual de cada variable como su interacción dentro del sistema suelo-atmósfera, base necesaria para el análisis presentado en los apartados siguientes.

4.4.2. Análisis de tendencias de variables ambientales

El análisis de las variables ambientales registradas permite identificar patrones de comportamiento diarios característicos del entorno donde se encuentra instalado el sistema. Estas tendencias se observan claramente en las gráficas generadas en Power BI, donde cada variable presenta variaciones cíclicas que responden a la dinámica natural del microclima en la plantación.

La temperatura del aire muestra un comportamiento periódico a lo largo del día, con incrementos progresivos desde las primeras horas de la mañana, valores máximos alrededor

del mediodía y descensos durante la tarde y noche. Este comportamiento se refleja de manera inversa en la humedad relativa del aire, evidenciando la relación física existente entre ambas variables.

Por su parte, la radiación solar presenta un patrón claramente definido que inicia con valores bajos en horas de la mañana, alcanza su máximo alrededor del mediodía y desciende hacia la tarde, confirmando la correcta captación de la luminosidad ambiental por parte del sensor y su conversión a valores representativos de radiación global.

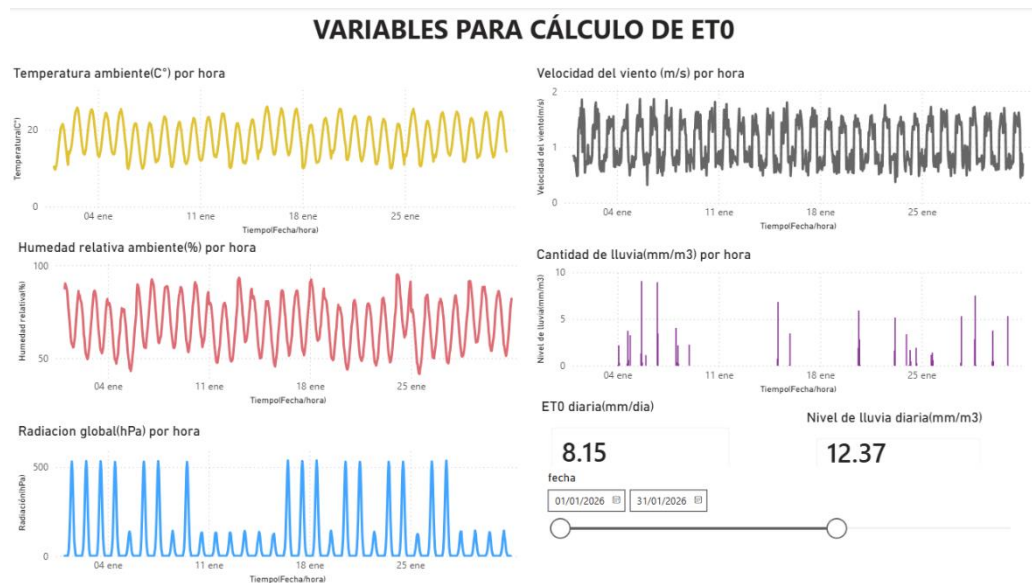
La velocidad del viento presenta variaciones menos predecibles, con incrementos y disminuciones irregulares a lo largo del día, comportamiento típico de esta variable en campo abierto. En contraste, la precipitación se manifiesta como eventos puntuales que rompen la continuidad de las tendencias observadas en el resto de las variables.

En cuanto a las variables del suelo, se observa que la temperatura del suelo sigue un comportamiento similar al de la temperatura del aire durante las horas de mayor radiación, mientras que la humedad del suelo responde directamente a los eventos de precipitación y a los periodos de mayor evapotranspiración.

Estas tendencias evidencian que el sistema no solo registra valores numéricos, sino que capta de forma coherente la dinámica ambiental real del entorno, proporcionando una base sólida para el análisis posterior de las relaciones entre variables y su influencia en la evapotranspiración. La Figura 39 indica como es el comportamiento y variación en el tiempo de las variables censadas y que determinan la ET_0 .

Figura 39.

Comportamiento horario de las variables ambientales registradas en Power BI



Nota: Elaboración propia, tomada de Power BI.

Adicionalmente, para validar el comportamiento de las variables registradas por el prototipo, se realizó una comparación cualitativa con los gráficos disponibles en el visor de la estación meteorológica Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) correspondiente a la Estación Meteorológica Ibarra - 1 (código M1240), ubicada a pocos metros del área de instalación del sistema.

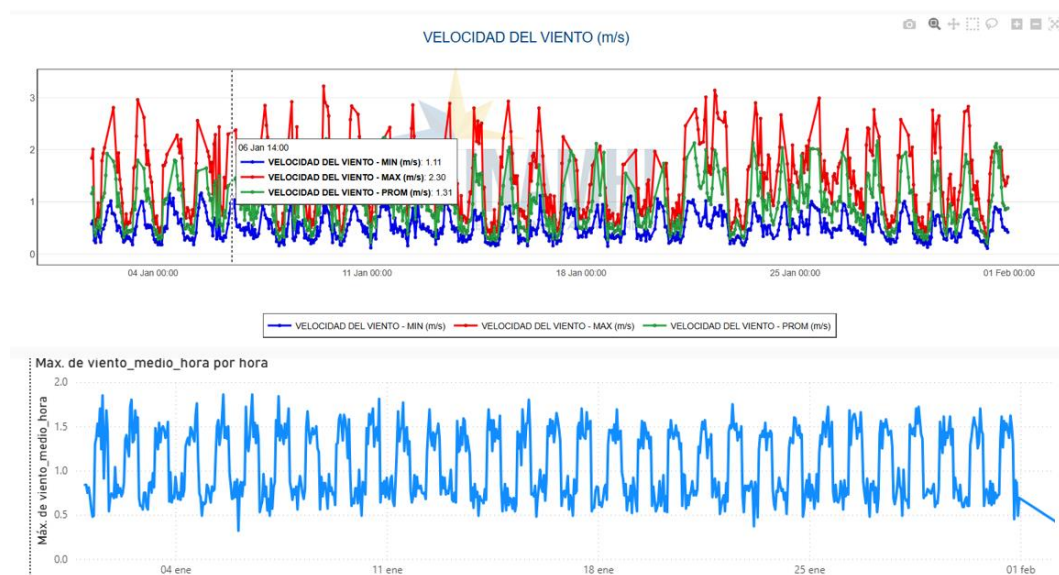
Si bien no se realizó una comparación numérica directa de los valores, se observó que las tendencias diarias de temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento presentan comportamientos coherentes entre ambas fuentes. Esta concordancia en los patrones de variación confirma que las mediciones obtenidas por el sistema desarrollado reflejan adecuadamente las condiciones ambientales reales del entorno.

En la Figura 40 se destacan 2 graficas, la primera corresponde a la gráfica tomada de un visor proporcionado por el INAMHI donde se destaca la variable de la velocidad del viento(m/s) en función del tiempo(días). Se puede identificar que hay valores pico de varios días que llegan hasta 3 m/s de velocidad del viento máximos(color rojo)registrados por esta

estación, y en la gráfica inferior es la tendencia obtenida desde el Power BI del proyecto donde se destacan picos de hasta 1.55 m/s, cabe mencionar que la velocidad del viento que se maneja en el proyecto son registros de “promedio” de velocidad del viento diario, es decir que conforme a las lecturas registradas durante el día se hacen en total 24 promedios(1 por cada hora del día) y en base a esos valores se grafican en la gráfica. Como se puede ver el grafico del INAMHI también cuenta con una tendencia de velocidad del viento promedio donde se muestran valores de hasta 1.35 m/s aproximadamente siendo así un valor muy cercano y a validar con los que se muestra de la estación del INAMHI para esta variable.

Figura 40.

Comparativa entre grafica del INAMHI y Power BI



Nota: Elaboración propia en base a Datos Meteorológicos obtenidos por el Visor Web del INAMHI y el Power BI del proyecto.

4.4.3. Relación entre variables

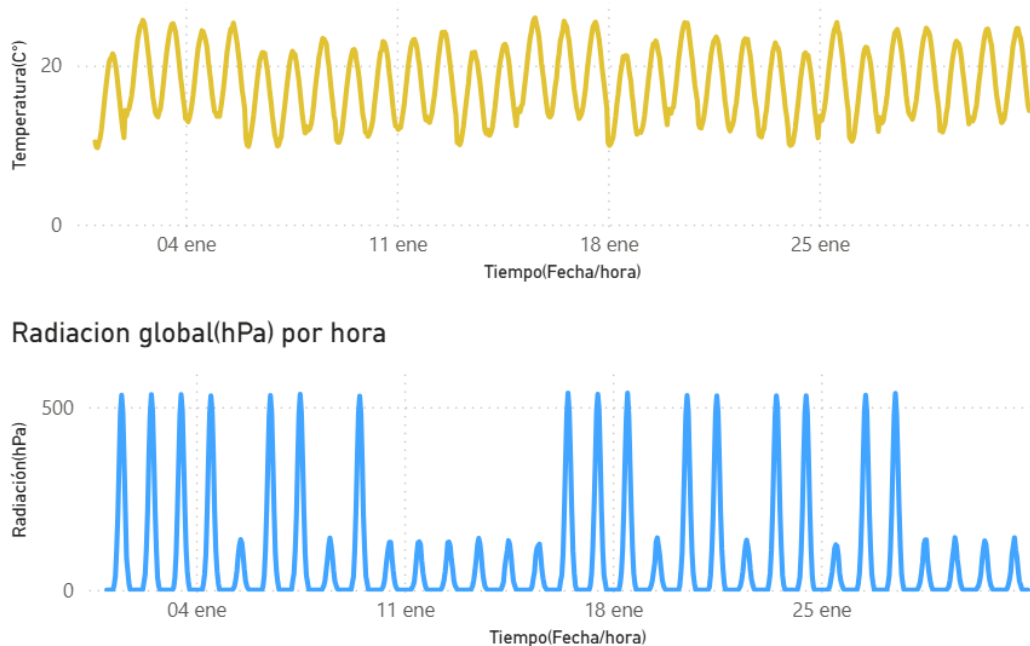
El análisis conjunto de las variables ambientales registradas permite verificar la coherencia física del sistema de medición y su pertinencia dentro del modelo de estimación de evapotranspiración implementado en el prototipo.

De acuerdo con el modelo FAO-56 Penman-Monteith, la ET_0 depende principalmente del balance de energía (radiación neta), del gradiente de vapor de agua y de la resistencia aerodinámica asociada al viento (Allen et al., 1998). En consecuencia, las relaciones entre radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento no solo constituyen fenómenos climáticos aislados, sino variables acopladas que determinan la demanda evaporativa del ambiente.

En la Figura 41 se presenta la relación entre radiación solar media horaria y temperatura del aire. Se observa que los incrementos en radiación preceden y acompañan el aumento térmico durante las horas centrales del día, lo cual confirma la dependencia directa entre disponibilidad energética y calentamiento atmosférico. Este comportamiento responde al balance de energía superficial, donde la radiación incidente representa la principal fuente de energía para los procesos de calentamiento y evaporación.

Figura 41.

Relación horaria entre radiación solar global y temperatura del aire

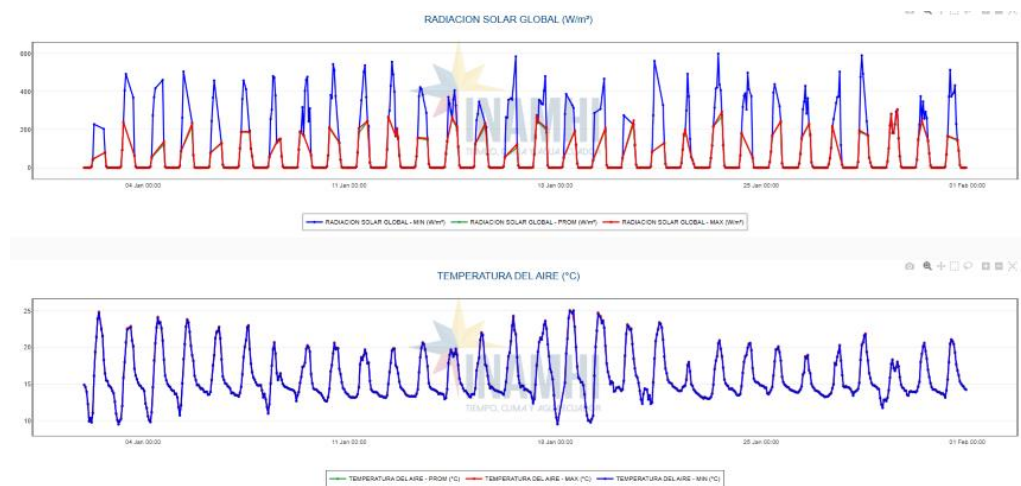


Nota: Elaboración propia, tomada de Power BI.

Por otro lado, en la Figura 42 se indica las mismas variables obtenidas a partir de la estación meteorológica del INAMHI mencionada. Como se observa en el gráfico de radiación solar este está en W/m^2 (vatios por metro cuadrado) que representa la energía por unidad de tiempo en proporción de una superficie en específico. Se destaca que el promedio de esta radiación al día coincide con los máximos de temperatura del aire de hasta $25^{\circ}C$ en los días con más radiación solar. Para ambos gráficos cuando hay descenso en temperatura y radiación solar es cuando cae la noche dando mínimos de hasta $10^{\circ}C$ y $47 W/m^2$ respectivamente.

Figura 42.

Relación radiación solar y temperatura del aire según estación INAMHI



Nota: Obtenido en base a los Datos Meteorológicos obtenidos por el Visor Web del INAMHI

4.4.4. Análisis histórico de la evapotranspiración

El análisis histórico de la evapotranspiración se realizó a partir de los valores diarios de ET_0 obtenidos mediante el modelo Penman-Monteith FAO-56, utilizando las variables promedio diarias registradas por el sistema: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar estimada.

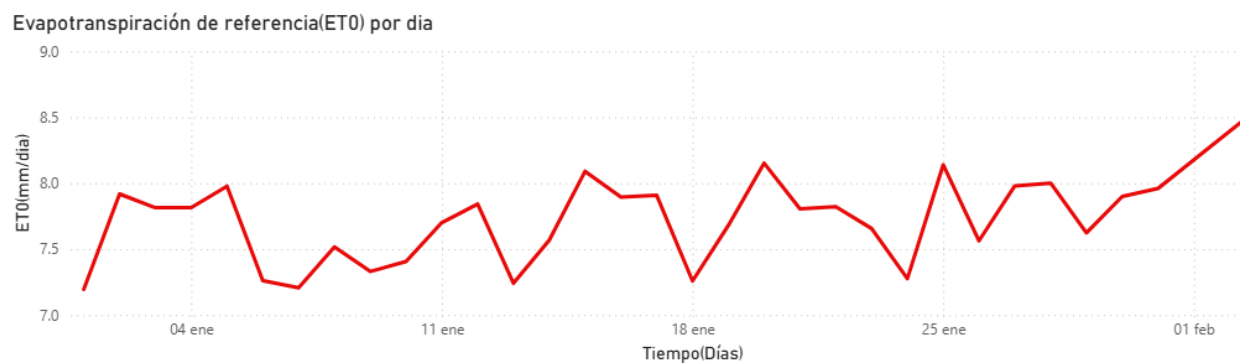
De acuerdo con Allen et al. (1998), la evapotranspiración de referencia representa la demanda evaporativa atmosférica bajo condiciones estándar, y constituye el parámetro base

para la estimación del requerimiento hídrico de un cultivo específico mediante la aplicación del coeficiente de cultivo (K_c). Por tanto, el análisis temporal de ET_0 permite evaluar la variabilidad de la demanda hídrica potencial en función de las condiciones climáticas locales.

En la Figura 43 se presenta la evolución diaria de ET_0 durante el periodo de evaluación.

Figura 43.

Evolución diaria de la evapotranspiración de referencia (ET_0)



Nota: Elaboración propia, tomada de Power BI

El comportamiento histórico observado en los resultados indica que el sistema implementado captura adecuadamente la dinámica de estos factores, reproduciendo patrones consistentes con los principios del balance de energía superficial y transporte de masa descritos en la metodología FAO-56.

Adicionalmente, al contrastar la tendencia general de ET_0 con los datos de la estación meteorológica del INAMHI se observa concordancia en la variabilidad estacional y diaria de la demanda evaporativa, lo que fortalece la validez técnica del sistema desarrollado.

Es importante destacar que los valores obtenidos corresponden a evapotranspiración de referencia (ET_0). Para estimar la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) en nogales jóvenes, se requiere aplicar el coeficiente de cultivo (K_c), conforme a la relación:

Ecuación 4: *Evapotranspiración de cultivo*

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

(4)

Donde el valor de K_c depende de la etapa fenológica (relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos), densidad de plantación y grado de cobertura del suelo (Allen et al., 1998). En el caso de nogales de aproximadamente dos años de establecimiento, el K_c se encuentra generalmente en fase inicial-intermedia, con valores inferiores a 1 debido a la cobertura parcial del terreno.

Este análisis confirma que el sistema no solo calcula correctamente ET_0 , sino que proporciona la base cuantitativa necesaria para estimaciones agronómicas posteriores relacionadas con programación de riego y balance hídrico del cultivo.

4.5. Evaluación del funcionamiento integral del prototipo

Este apartado evalúa el desempeño del prototipo como un sistema IoT operativo de extremo a extremo, considerando la adquisición de datos en el nodo sensor, la transmisión mediante MQTT, la recepción en el nodo coordinador, el almacenamiento en SQLite y la generación automática de archivos CSV para visualización en Power BI. La verificación integral permite confirmar que la arquitectura propuesta opera de forma continua y coherente bajo condiciones reales de uso, garantizando que los datos empleados en el análisis ambiental y de evapotranspiración provienen de un proceso automatizado y estable.

4.5.1. Operación conjunta del nodo sensor y nodo coordinador

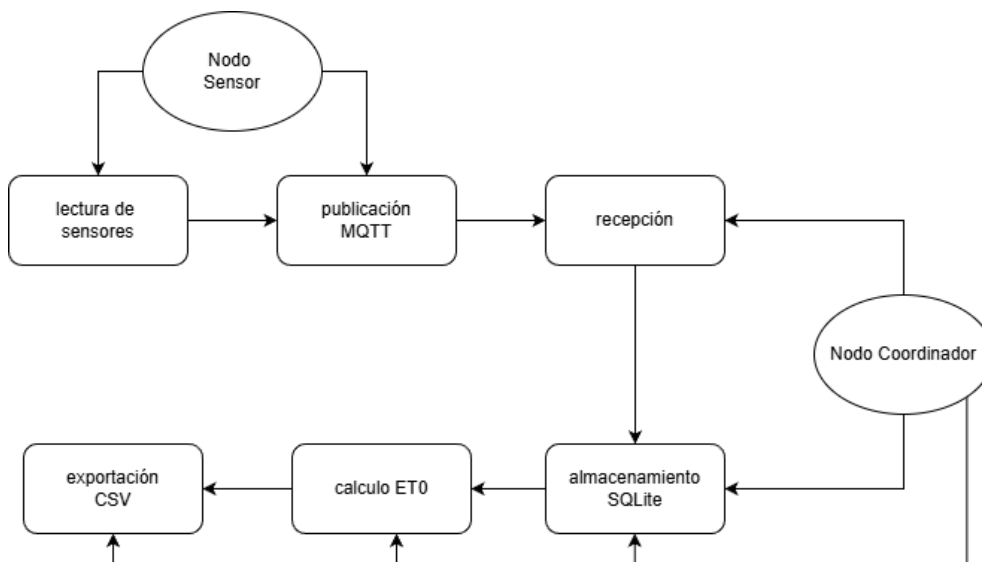
La operación conjunta se basa en un esquema publicador–suscriptor mediante MQTT. El nodo sensor ejecuta el proceso de lectura de sensores y publicación periódica de un mensaje estructurado que contiene el conjunto completo de variables medidas. Este mensaje se publica en un tópico predefinido y es consumido por el nodo coordinador, el cual permanece suscrito y procesa cada lectura recibida.

El nodo coordinador valida la estructura del mensaje, registra los valores en la tabla *lecturas* de la base de datos y ejecuta el cálculo correspondiente de evapotranspiración de

referencia, garantizando que cada registro almacenado represente una medición completa asociada a una marca temporal.

Figura 44.

Flujo de operación extremo a extremo del sistema



Nota: Elaboración propia.

4.5.2. Estabilidad de la transmisión MQTT durante el periodo de prueba

Durante el periodo de evaluación, la comunicación MQTT se mantuvo activa, permitiendo la recepción continua de lecturas sin intervención manual. La estabilidad se verificó observando la consistencia temporal de los registros almacenados en la base de datos, así como la presencia de datos consecutivos conforme a la periodicidad configurada.

En términos operativos, la transmisión se considera estable cuando:

- existe continuidad en la secuencia temporal de registros
- no se presentan pérdidas prolongadas de datos
- la frecuencia de recepción se mantiene dentro del margen esperado respecto al intervalo de publicación.

Tabla 22.

Verificación de continuidad de transmisión diaria del sistema para la primera semana de enero

Fecha	Registros esperados	Registros almacenados	Porcentaje de continuidad
2026-01-01	288	288	100%
2026-01-02	288	288	100%
2026-01-03	288	289	100.3%
2026-01-04	288	288	100%
2026-01-05	288	287	99.65%
2026-01-06	288	288	100%
2026-01-07	288	289	100.3%

Nota: Elaboración propia en base a los registros obtenidos en la base de datos SQLite durante el periodo de pruebas para la semana 1.

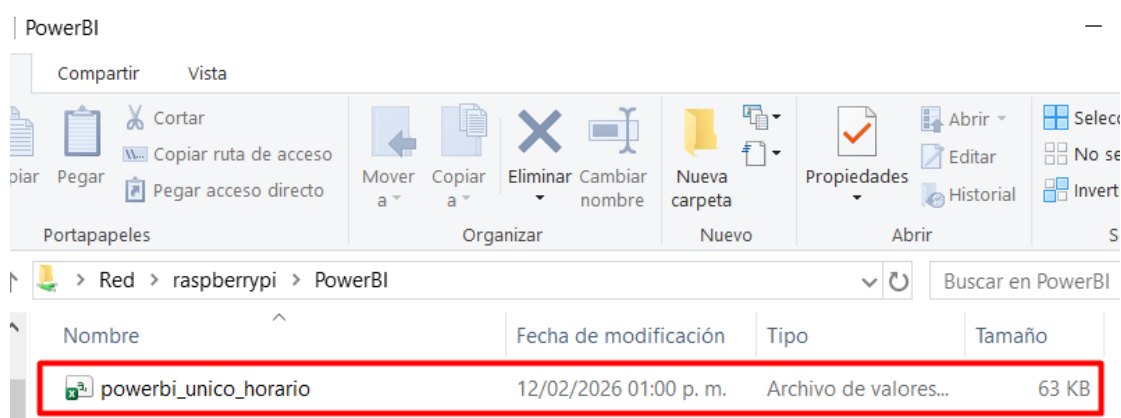
4.5.3. Comportamiento del almacenamiento y generación de archivos CSV

El almacenamiento de lecturas se realiza en SQLite, lo que permite consultar la información cronológicamente y ejecutar procesos automáticos de agregado temporal. A partir de esta base, el nodo coordinador genera un archivo CSV único con agregación horaria para su uso en Power BI, garantizando que la visualización se alimente desde datos estructurados y normalizados.

El archivo CSV se mantiene accesible en red local mediante un recurso compartido, permitiendo que Power BI lo consuma directamente desde un equipo cliente sin necesidad de transferencia manual. Esta automatización asegura que el panel de visualización pueda actualizarse conforme se incorporan nuevos registros a la base de datos.

Figura 45.

Archivo CSV exportado automáticamente para la visualización de datos en Power BI.



Nota: Elaboración propia, archivo csv exportado y visualizado localmente por el servidor samba en el nodo coordinador.

4.6. Interpretación agronómica de los resultados

La información climática registrada por el sistema desarrollado no solo permite calcular la ET_0 , sino que constituye la base para estimar la demanda hídrica real del cultivo de nogal. En este apartado se realiza la conversión de ET_0 a evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante la aplicación del coeficiente de cultivo (K_c), y se analiza el balance hídrico correspondiente al mes de enero, considerando la precipitación acumulada registrada en el mismo periodo.

4.6.1. Determinación del coeficiente de cultivo para nogal joven

El coeficiente de cultivo (K_c) representa la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia, y depende principalmente de la etapa fenológica, el grado de cobertura vegetal y las condiciones de manejo del cultivo.

En el caso de nogales jóvenes con aproximadamente dos años de establecimiento, la cobertura del suelo es parcial, con separación entre árboles de 3 a 4 metros, lo que implica una contribución significativa de la evaporación directa del suelo y una transpiración aún en fase

de desarrollo. Para cultivos leñosos en etapa inicial–intermedia, el coeficiente de cultivo suele ubicarse en un rango aproximado de:

Ecuación 5: *Rango de Coeficiente de cultivo etapa inicial*

$$0.45 \leq K_c \leq 0.65 \quad (5)$$

Considerando las características observadas en campo (altura promedio de 2–2.5 m y cobertura parcial), para el análisis mensual se adopta un valor promedio:

Ecuación 6: *Valor de Coeficiente de cultivo elegido*

$$K_c = 0.55 \quad (6)$$

Este valor permite estimar de forma razonable la demanda hídrica real del cultivo durante el periodo evaluado.

4.6.2. *Estimación mensual de la evapotranspiración del cultivo (ET_c)*

La evapotranspiración del cultivo se calcula mediante:

Ecuación 7: *Evapotranspiración de Cultivo a calcular*

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (7)$$

Utilizando los valores diarios de ET₀ generados por el sistema durante el mes de enero, se obtuvo la evapotranspiración acumulada mensual del cultivo.

La suma mensual de ET_c representa la lámina total de agua demandada por el cultivo durante el mes bajo condiciones atmosféricas reales del entorno. La ET_c esta medida en mm/día(milímetro por día), esto se refiere a la lámina de agua que el cultivo pierde por evaporación y transpiración (1 mm = 10m³/hectárea) o en termino más entendible es la tasa de milímetro por unidad de tiempo. Para el acumulado que se indica al final de la tabla es la suma de ET_c durante el mes (mm/mes).

En la Tabla 23 se muestra la evolución diaria de ET_c estimada para el mes de enero:

Tabla 23.*Evolución diaria estimada de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante enero*

Fecha	ET0	ETc
01/01/2026	7.195	3.96
02/01/2026	7.918	4.35
03/01/2026	7.814	4.30
04/01/2026	7.814	4.30
05/01/2026	7.977	4.39
06/01/2026	7.26	3.99
07/01/2026	7.207	3.96
08/01/2026	7.517	4.13
09/01/2026	7.33	4.03
10/01/2026	7.406	4.07
11/01/2026	7.701	4.24
12/01/2026	7.842	4.31
13/01/2026	7.241	3.98
14/01/2026	7.568	4.16
15/01/2026	8.09	4.45
16/01/2026	7.895	4.34
17/01/2026	7.908	4.35
18/01/2026	7.258	3.99
19/01/2026	7.679	4.22
20/01/2026	8.152	4.48
21/01/2026	7.805	4.29
22/01/2026	7.821	4.30
23/01/2026	7.656	4.21
24/01/2026	7.276	4.00
25/01/2026	8.139	4.48
26/01/2026	7.563	4.16
27/01/2026	7.98	4.39
28/01/2026	8.001	4.40
29/01/2026	7.623	4.19
30/01/2026	7.899	4.34
31/01/2026	7.96	4.38
SUMA	238.495	131.17

Nota: Elaboración propia a partir de ET₀ calculada por el sistema y Kc adoptado para plantación de nogal joven.

4.6.3. *Análisis del balance hídrico mensual*

El balance hídrico mensual se evaluó mediante la comparación entre:

- Precipitación acumulada mensual (mm)
- Evapotranspiración del cultivo acumulada mensual (mm)

Ecuación 8: *Expresión de balance hídrico*

$$\text{Balance Hídrico} = P_{mes} - ETc_{mes} \quad (8)$$

- P_{mes} corresponde a la precipitación acumulada registrada.
- ETc_{mes} corresponde a la evapotranspiración acumulada estimada.

Si la precipitación mensual es inferior a la evapotranspiración estimada, se genera un déficit hídrico potencial. En un sistema de cultivo en secano (que depende únicamente de las precipitaciones como único medio de riego), como el evaluado, esta condición puede traducirse en estrés hídrico, dependiendo de la capacidad retención de líquido del suelo.

Ecuación 9: *Cálculo de balance hídrico*

$$\begin{aligned} \text{Balance Hídrico} &= 109.455 - 131.14 \\ \underline{\text{Balance Hídrico}} &= \underline{-21.685} \end{aligned} \quad (9)$$

Dado el cálculo de balance hídrico se destaca que hay un balance negativo dado que el nivel de precipitación acumulada mensual es menos a la de la Evapotranspiración del cultivo mensual, quiere decir que el Nogal donde se está midiendo tiene un déficit hídrico a compensar.

En la Tabla 24 se presenta la comparación entre la precipitación mensual y la evapotranspiración del cultivo.

Tabla 24.*Comparación entre precipitación diaria y evapotranspiración del cultivo en enero*

Fecha	lluvia_mm_dia	ETc
01/01/2026	0	3.96
02/01/2026	0	4.35
03/01/2026	0	4.3
04/01/2026	10.389	4.3
05/01/2026	11.843	4.39
06/01/2026	12.368	3.99
07/01/2026	0	3.96
08/01/2026	9.043	4.13
09/01/2026	0	4.03
10/01/2026	0	4.07
11/01/2026	0	4.24
12/01/2026	0	4.31
13/01/2026	0	3.98
14/01/2026	0	4.16
15/01/2026	11.101	4.45
16/01/2026	0	4.34
17/01/2026	0	4.35
18/01/2026	0	3.99
19/01/2026	0	4.22
20/01/2026	10.664	4.48
21/01/2026	0	4.29
22/01/2026	0	4.3
23/01/2026	10.112	4.21
24/01/2026	4.382	4
25/01/2026	3.593	4.48
26/01/2026	0	4.16
27/01/2026	5.6	4.39
28/01/2026	10.378	4.4
29/01/2026	4.686	4.19
30/01/2026	5.296	4.34
31/01/2026	0	4.38
SUMA	109.455	131.14

Nota: Elaboración propia a partir del nivel de lluvia medida diaria y la ETc calculada.

4.6.4. Implicaciones para el manejo hídrico del cultivo

Dado que la plantación evaluada no cuenta con sistema de riego artificial, el suministro de agua depende exclusivamente de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener humedad.

Cuando la evapotranspiración del cultivo supera la precipitación acumulada, el cultivo debe compensar la diferencia mediante la humedad almacenada en el suelo. En periodos prolongados de déficit, puede producirse reducción en crecimiento vegetativo y desarrollo radicular.

El sistema implementado permite cuantificar esta dinámica de forma continua, proporcionando información objetiva para:

- Evaluar necesidad futura de riego suplementario.
- Analizar periodos críticos de demanda hídrica.
- Estimar escenarios de manejo en función de variabilidad climática.

Este análisis confirma que el prototipo desarrollado no se limita al monitoreo ambiental, sino que constituye una herramienta de soporte para la toma de decisiones en la gestión hídrica del cultivo de nogal.

4.7. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema desarrollado cumple con la adquisición, transmisión y procesamiento automatizado de variables meteorológicas necesarias para el cálculo de evapotranspiración de referencia. La coherencia observada entre radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento confirma que el prototipo captura dinámicas atmosféricas físicamente consistentes.

La variación diaria de la ET_0 mostró comportamientos acordes con el modelo Penman-Monteith FAO-56, particularmente en días con mayor radiación solar y menor humedad relativa, donde los valores de ET_0 se incrementaron de manera proporcional. Este

comportamiento coincide con la estructura física del modelo, en el cual la radiación neta y el déficit de presión de vapor constituyen los principales impulsores del proceso evaporativo.

Al contrastar la tendencia general de las variables registradas con la estación meteorológica del INAMHI ubicada en proximidad al área de estudio, se observa similitud en la dinámica diaria de temperatura, humedad y precipitación. Si bien no se realizó una calibración instrumental directa, la correspondencia en patrones temporales refuerza la validez del sistema como herramienta de monitoreo ambiental local.

Desde el punto de vista agronómico, la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) permitió identificar periodos donde la demanda hídrica superó la precipitación acumulada, lo cual sugiere la existencia de déficit hídrico potencial bajo condiciones de secano. Este hallazgo demuestra que el prototipo no solo registra datos ambientales, sino que proporciona información cuantificable para evaluar el balance hídrico del cultivo de nogal joven.

En términos tecnológicos, la arquitectura basada en dos nodos y comunicación MQTT demostró estabilidad operativa, con continuidad en el almacenamiento de registros y generación automática de archivos para análisis. La integración entre hardware de bajo consumo, procesamiento local y visualización en Power BI constituye una solución replicable y escalable para aplicaciones agrícolas similares.

No obstante, se identifican limitaciones inherentes al sistema implementado. La estimación de radiación solar se basa en una conversión aproximada desde lux, lo que puede introducir desviaciones respecto a sensores especializados. Asimismo, el coeficiente de cultivo (Kc) fue adoptado a partir de literatura técnica y no mediante mediciones directas del estado fenológico específico del lote evaluado.

El análisis del comportamiento de la evapotranspiración del cultivo, junto con la precipitación registrada, permite interpretar que el entorno presenta condiciones climáticas

compatibles con el desarrollo de nogales en etapa juvenil. Si bien el cultivo se encuentra expuesto a variabilidad hídrica propia de sistemas en seco, la magnitud de la demanda evaporativa observada y la disponibilidad de humedad permiten considerar que la implementación del cultivo en la zona resulta factible desde el punto de vista agroclimático, siempre que se contemple el manejo del suelo y monitoreo continuo de las condiciones ambientales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

- El sistema desarrollado permite el monitoreo continuo de variables ambientales relevantes para el cálculo de evapotranspiración en plantaciones jóvenes de nogal, integrando adquisición, transmisión, almacenamiento y procesamiento automatizado bajo una arquitectura IoT funcional y estable.
- La implementación del modelo Penman-Monteith FAO-56 sobre los datos registrados demuestra que la plataforma es capaz de estimar de forma consistente la evapotranspiración de referencia (ET_0), reproduciendo comportamientos coherentes con la dinámica climática local.
- La conversión de ET_0 a evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante la aplicación de un coeficiente de cultivo representativo para nogal joven permite cuantificar la demanda hídrica real del cultivo, alineando el sistema tecnológico con una aplicación agronómica concreta.
- El análisis del balance hídrico mensual evidencia que, en condiciones de cultivo en secano, pueden presentarse periodos donde la demanda evaporativa supera la precipitación acumulada, lo que sugiere potenciales escenarios de déficit hídrico dependiendo de la capacidad de almacenamiento del suelo.
- La estabilidad de la comunicación MQTT, la continuidad en el registro de datos y la generación automática de archivos CSV para visualización en Power BI confirman que el prototipo funciona como un sistema integral de monitoreo ambiental, con capacidad de operación autónoma y replicabilidad en contextos agrícolas similares.
- Las limitaciones instrumentales identificadas —como la estimación indirecta de radiación solar y la adopción bibliográfica del coeficiente de cultivo— no invalidan la aplicabilidad

del sistema, pero delimitan su alcance como herramienta de estimación técnica y no como instrumento de medición meteorológica certificada.

- El desarrollo implementado constituye una solución tecnológica de bajo costo orientada a agricultura de precisión en pequeña escala, demostrando que es posible integrar microcomputadores, sensores ambientales y herramientas de análisis de datos para apoyar la gestión hídrica de cultivos permanentes.
- La evaluación de la evapotranspiración del cultivo estimada a partir de los datos registrados permite inferir que las condiciones climáticas del área de estudio presentan un comportamiento hídrico compatible con el desarrollo de plantaciones jóvenes de nogal. La relación observada entre demanda evaporativa y precipitación indica que, aunque pueden presentarse periodos de déficit potencial, la disponibilidad natural de humedad y las características del entorno permiten considerar viable la implementación del cultivo bajo condiciones de manejo adecuadas, confirmando la factibilidad de establecimiento del nogal desde un punto de vista agroclimático.

RECOMENDACIONES:

- Se debe incorporar un sensor de radiación solar tipo piranómetro para mejorar la precisión del componente radiativo (radiación solar) del modelo de evapotranspiración y reducir la incertidumbre asociada a la conversión lux–radiación.
- Realizar caracterización física del suelo (textura, capacidad de campo y punto de marchitez permanente) con el fin de complementar el análisis de balance hídrico y estimar con mayor exactitud la disponibilidad real de agua para el cultivo.
- Implementar almacenamiento en nube como respaldo adicional para garantizar redundancia de datos y facilitar acceso remoto continuo al sistema.
- Extender el periodo de monitoreo a ciclos anuales completos para analizar variabilidad estacional y mejorar la robustez estadística del análisis de evapotranspiración.
- Evaluar la integración futura del sistema con mecanismos automatizados de riego controlados, permitiendo evolucionar desde monitoreo pasivo hacia control activo basado en demanda hídrica proporcionando lo adecuado e ideal de forma dinámica.

REFERENCIAS

- Adafruit. (2020). *MCP3008 - 8-Channel 10-Bit ADC*. <https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/055/546/original/MCP3008.pdf>.
- Aguilar, F., & Romero, D. (2020). Diseño de sistemas embebidos para monitoreo ambiental utilizando MQTT y sensores de bajo costo. *Revista de Tecnologías Emergentes*, 5(2), 41–50.
- Aletà, N., & Vilanova, A. (2006). EL NOGAL HÍBRIDO. *Navarra Forestal* Nº 13.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO Riego Y Drenaje No 56*.
- Amazon. (n.d.). *NOYITO Sensor de intensidad de luz digital BH1750 – Paquete de 2*. <https://www.amazon.com/-/es/NOYITO-Intensidad-Digital-BH1750-Paquete/Dp/B07PNL13XM>.
- Anaya-Isaza Diego H Peluffo-Ordoñez, A. J., Ivan-Rios Juan Castro-Silva, J. A., & Carvajal Ruiz Luis H Espinosa Llanos, D. A. (2016). *Internet of Things for Irrigation System (IoT)*.
- Arduino. (2023). Arduino Uno Rev3: Datasheet. In <https://docs.arduino.cc>.
- BeagleBoard. (2020). BeagleBone Black System Reference Manual. In <https://beagleboard.org>.
- Belmonte, A. C. (2005). La evapotranspiración: concepto y metodología de cálculo. *Agua y Agronomía*, 163–238. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tWkJAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PA163&>

dq=calculo+evapotranspiracion&ots=QxfOvXqBBO&sig=ilkdUBZAdLrjEnVDCD35IT
aWXC4#v=onepage&q&f=false

- Bielsa, A., & Jiménez, M. (2019). Cultivo de nogales: recomendaciones técnicas y sanitarias. *Editorial Agroecología Ibérica*.
- Bosch Sensortec. (2021). *BME280: Combined humidity and pressure sensor*.
<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>.
- Buitrón Ruiz, D. F. (2022). *Arquitecturas y modelos de referencia para sistemas IoT: estado del arte de las arquitecturas para sistemas IoT*. Quito: EPN, 2022.
- Calderón, J., Villalobos, D., & Vásquez, R. (2023). Diseño de un sistema de monitoreo ambiental IoT para la gestión hídrica en cultivos andinos. *Revista Tecnología y Ciencia Agropecuaria*, 17(2), 55–68.
- Cárdenas, C., Hernández, A., & Muñoz, F. (2020). Aplicación de redes de sensores inalámbricos en agricultura de precisión. *Revista Colombiana de Computación*, 21(2), 45–60.
- Carranza, P., & Peñafiel, R. (2022). Protocolos de comunicación en sistemas de agricultura inteligente con IoT. *Revista Científica AgroDigital*, 9(1), 44–51.
- Cedeño, M., & Salazar, L. (2020). Prototipado rápido de sistemas electrónicos aplicados al monitoreo ambiental. *Revista Técnica ESPOL*, 43(2), 71–78.
- Cordero, M., Díaz, H., & Valverde, C. (2021). Diseño e implementación de un sistema IoT para monitoreo ambiental en cultivos andinos. *Revista Avances En Agroindustria*, 15(1), 42–53.
- Cruz, A., Garcia, M., & Molina, D. (2021). Monitoreo ambiental con WSN en cultivos agrícolas del altiplano mexicano. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(4), 71–85.

DCNC Sciences. (n.d.). *Módulo Máster Introduction To Python*.

<https://www.dcnsciences.com/introduction-to-python/>.

De Miguel, R. (2023). *COMPARATIVA: examinamos 11 plataformas de business intelligence (BI)*. https://revistabyte.es/comparativa/plataformas-de-business-intelligence-bi/#ARBENTIA_Power_Bizz

DFRobot. (n.d.-a). *Gravity: Sensor de humedad del suelo capacitivo v2.0*.

https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193_.

DFRobot. (n.d.-b). *Gravity: Solar Power Manager 5V*.

https://wiki.dfrobot.com/Solar_Power_Manager_5V_SKU_DFR0559_.

Elmasri, R., & Navathe, S. (2016). *Fundamentos de sistemas de bases de datos* (7th ed.). Pearson.

Espressif Systems. (2022). ESP32-WROOM-32 Data Sheet: Version 4.1. In <https://www.espressif.com>.

Fernández, C., Zúñiga, J., & Buitrago, L. (2018). Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas aplicadas a la agricultura inteligente. *Revista Ingeniería y Región*, 16(2), 41–52.

Fine Offset Electronics. (2012a). *WH-SP-RG: Rain Gauge – Technical Specifications*.

https://www.sparkfun.com/datasheets/sensors/weather/raingauge_instructions.pdf.

Fine Offset Electronics. (2012b). *WH-SP-WS01: Wind Speed Sensor – Technical Specifications*

.

https://www.sparkfun.com/datasheets/sensors/weather/anemometer_instructions.pdf

.

FTP Shop. (n.d.). *Học Power BI*. <https://fptshop.com.vn/Tin-Tuc/Danh-Gia/Hoc-Power-Bi-183657>.

- Gaffney, E. (2022). SQLite: Past, present, and future. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 15(1), 3535–3548.
- Garadasu, S., Byri, A., Nadukuru, S., & Goel, O. (2025). Building interactive dashboards for improved decision-making: A guide to Power BI and DAX. *International Journal of Worldwide Engineering Research*, 13(2), 45–59.
- García, J. (2018). Pruebas de integración en sistemas distribuidos y aplicaciones IoT. *Revista Iberoamericana de Ingeniería de Software*, 12(3), 45–58.
- García, J., & Ruiz, D. (2021). Diseño modular de sistemas embebidos en entornos rurales: experiencias en campo. *Tecnologías Emergentes*, 9(3), 112–127.
- García-Mendoza, N., Rincón, J., & Soto, L. (2021). Metodología en V para el desarrollo de sistemas embebidos aplicados al monitoreo ambiental. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 29(2), 34–45.
- Gómez, A., & Bautista, D. (2010). Inteligencia de negocios: Estado del arte. *Scientia et Technica*, 1(44), 321–326.
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1803/1209>
- Gómez, A., Castro, J., & Pérez, R. (2019). Aplicación del modelo FAO Penman-Monteith en sistemas automatizados de riego con monitoreo remoto. *Revista de Ciencias Agronómicas*, 36(1), 34–45.
- Gómez, J., & Rodríguez, M. (2020). *Desarrollo de soluciones IoT con Python: Automatización y control con Raspberry Pi*. Marcombo.
- Gómez, L., Ortega, F., & Valenzuela, A. (2022). Microcomputadoras para aplicaciones de sensado remoto: uso en sistemas agrícolas. *Tecnología e Innovación*, 9(4), 103–115.
- Gómez, M., & Salinas, P. (2022). Diseño escalable de sistemas IoT para monitoreo agrícola en zonas rurales. *Revista Iberoamericana de Tecnología*, 18(1), 34–45.

- González, L., & Pérez, J. (2022). Sensores ambientales en agricultura de precisión: monitoreo en frutales caducifolios. *Revista Tecnología Agrícola*, 35(1), 45–59.
- González, R., Morales, C., & Salvatierra, L. (2020). Arquitectura modular para sistemas IoT de monitoreo ambiental en zonas rurales. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Electrónica*, 15(2), 60–72.
- Greptime. (2024). A review of databases in the IoT era. *Greptime Research Report*.
- Grupo Electrostore. (n.d.). *Sensor BME280 con salida I2C/SPI*.
<https://Grupoelectrostore.Com/Wp-Content/Uploads/2022/12/61geMXXgOzL.Jpg>.
- Hervas, C. (2018). *Análisis de rendimiento de protocolos de publicación/suscripción en comunicación con una red de sensores inalámbricos Zigbee*. Universidad Nacional de la Plata.
- HiveMQ. (n.d.). *Get HiveMQ*. <https://Www.Hivemq.Com/Company/Get-Hivemq/>.
- HWLibre. (n.d.). *DS18B20: características del sensor de temperatura*.
<https://Www.Hwlibre.Com/Ds18b20-Caracteristicas-Del-Sensor-de-Temperatura/>.
- Iannamico, L. A. (2006). *El cultivo del nogal en climas templado - fríos*.
https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig_1c20a687f026d28128c23cec9f743ee0
- Ingenium, W. (2021). *Proceso de evapotranspiración (evaporación y transpiración del cultivo)*.
<https://world-ingenium.blogspot.com/2021/02/proceso-de-evapotranspiracion.html>
- INTECO. (2017). *Guía de pruebas y validación de sistemas informáticos* (Gobierno de España, Ed.). Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación.
- ISO/IEC/IEEE. (2018). *Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering*. ISO/IEC/IEEE. ISO/IEC/IEEE.

- Jiménez, D., & Toledo, E. (2021). Diseño de redes de sensores para sistemas agrícolas basados en IoT. *Revista de Tecnología Agroindustrial*, 12(3), 88–97.
- Jimenez-Berni, J. A., Cabello-Leblic, A., Lopez-Guerrero, A., Villalobos, F. J., Testi, L., & Fereres, E. (2023). Energy balance determination of crop evapotranspiration using a wireless sensor network. *Frontiers in Agronomy*, 5. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1244633>
- Lema, R. (2023). *Almacenamiento y tratamiento de información en sistemas de adquisición de sensores en entornos con restricciones de recursos*.
- Liu, M., Tang, R., Li, Z. L., Mao, H., Zhou, F., & Yan, G. (2018). Estimation of annual averaged evapotranspiration by using passive microwave observations. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2018-July, 791–794. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518728>
- López, F., & Fernández, D. (2019). *Aplicaciones prácticas con Python para sistemas embebidos*. Alfaomega Grupo Editor.
- MAE. (n.d.). *MAE impulsa regulación para aprovechamiento forestal – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.ambiente.gob.ec/mae-impulsa-regulacion-para-aprovechamiento-forestal/>
- Martínez, D., & Romero, H. (2021). Sistemas de monitoreo ambiental con enfoque en eficiencia energética en IoT. *Revista de Ingeniería Electrónica y Aplicaciones*, 13(2), 22–30.
- Martínez-Cob, A. (2004). *Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la Cuenca del Ebro*. https://digital.csic.es/bitstream/10261/15896/1/NecHidrCHE04_T1_Mem.pdf
- Maxim Integrated. (2020). *DS18B20: Programmable resolution 1-Wire digital thermometer*. <https://www.hwlibre.com/Ds18b20-Characterísticas-Del-Sensor-de-Temperatura/>.

- Mecatrónica. (n.d.). *El sensor del pluviómetro mide el volumen de lluvia pulsada para estaciones meteorológicas y Arduino*. <https://Store.Mectronica.It/Es/Lluvia/1326-El-Sensor-Del-Pluviometro-Mide-El-Volumen-de-Lluvia-Pulsada-Para-Estaciones-Meteorologicas-y-Arduino-5051151024334.Html>.
- Ministerio de Agricultura, G. A. y P. (n.d.). *La política agropecuaria ecuatoriana Hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015-2025*. Retrieved May 15, 2024, from <http://www2.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/01-06PPP2015-POLITICA01.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020). *Boletín técnico sobre especies agroforestales con potencial comercial en el Ecuador*.
- Miranda Vargas, E. X. (2022). *Arquitecturas y modelos de referencia para sistemas IOT: estado del arte de los mecanismos de autenticación para dispositivos IOT*. Quito: EPN, 2022.
- Monge, M. A. (2019, July 23). *Evapotranspiración y Kc (parte II)*. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/evapotranspiracion-y-kc-parte-ii>
- Morales, J., Ríos, C., & Benítez, E. (2021). Componentes tecnológicos para monitoreo ambiental en cultivos agrícolas. *Revista Ciencias Agropecuarias y Ambientales*, 9(1), 67–78.
- Morales-Gutiérrez, A., & Porras-Hernández, J. (2021). Diseño e implementación de una estación meteorológica automatizada basada en Raspberry Pi y sensores ambientales. *Revista Iberoamericana de Tecnología Educativa*, 17(1), 22–35.
- NVIDIA. (2021). Jetson Nano Developer Kit User Guide (Rev. 2). In <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>.

- ONU. (n.d.). *Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad*. ONU. Retrieved June 4, 2024, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>
- Orange Pi. (2022). Orange Pi Zero 2 Hardware Specification. In <http://www.orangepi.org>.
- Orellana, P., Hidalgo, V., & Romero, F. (2021). Sistemas de sensores para monitoreo de variables agroclimáticas en tiempo real. *Revista Latinoamericana de Tecnología Ambiental*, 9(1), 23–31.
- Ortiz, R., & Chile, M. (2020). *Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco*. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/246/2461061007/html/index.html>
- Özmen, A., & Ertugrul, M. (2025). Comparative analysis of database technologies for IoT environments. *Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 16(4), 112–123.
- Paredes, A., Martínez, R., & Herrera, C. (2020). Redes de sensores inalámbricos y fiabilidad en la transmisión de datos en ambientes agrícolas. *Revista Andina de Electrónica*, 9(3), 55–66.
- Peña Merizalde, J. L., & Suquillo Chuquimarca, G. E. (2016). *Estudio del modelo de referencia del Internet de las Cosas (IoT), con la implementación de un prototipo domótico* [Quito, 2016.]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15096/1/CD-6908.pdf>
- PJRC. (2023). Teensy 4.0 Technical Specifications. In <https://www.pjrc.com/teensy>.
- Pressman, R., & Maxim, B. (2020a). *Ingeniería del software: Un enfoque práctico* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Pressman, R., & Maxim, B. (2020b). *Ingeniería del software: Un enfoque práctico* (8th ed.). McGraw-Hill.

- Quelal Córdova, S. A. (2018). *PLAN PARA LA EXPORTACIÓN DE ARTESANIAS DE MADERA DE SAN ANTONIO DE IBARRA HACIA EL MERCADO COLOMBIANO*.
<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8244/1/PG%20656%20TESIS.pdf>
- Raspberry Pi Foundation. (2021a). *Raspberry Pi Zero 2 W Product Brief*.
<https://datasheets.raspberrypi.com/rpizero2/Raspberry-Pi-Zero-2-w-Product-Brief.pdf>.
- Raspberry Pi Foundation. (2021b). *Raspberry Pi Zero 2 W Product Brief*. . In
<https://www.raspberrypi.com>.
- Raspberry Pi Welt. (n.d.). *Raspberry Pi OS Lite: Desktop nachinstallieren und VNC einrichten*.
<https://raspberrypiwelt.wordpress.com/2021/07/14/Raspberry-Pi-OS-Lite-Desktop-Nachinstallieren-Und-Vnc-Einrichten/>.
- Ríos, L., & Montenegro, S. (2023). Diseño de interfaces accesibles en plataformas de monitoreo ambiental. . . *Revista de Tecnología e Inclusión Digital*, 6(1), 88–97.
- RoboticsEC. (n.d.). *Sensor de humedad de suelo capacitivo v2.0*.
<https://roboticsec.com/producto/sensor-de-humedad-de-suelo-capacitivo-v2-0/>.
- Rodríguez, C., & Ríos, M. (2018). Aplicación del modelo V en sistemas electrónicos para agricultura de precisión. *Revista Electrónica de Innovación y Tecnología*, 10(1), 45–59.
- Rodríguez, J., Watts, C., Garatuza, J., & Lizárraga, C. (2011). EVAPOTRANSPIRACIÓN Y BALANCE HÍDRICO EN NOGAL PECANERO EN LA COSTA DE HERMOSILLO, MÉXICO. *XIV CONGRESO INTERNACIONAL EN CIENCIAS AGRÍCOLAS*. .
<https://dagus.unison.mx/publicaciones/congresos/XIV%20Congreso%20Internacional/Evapotrspiraci%C3%B3n%20y%20balance%20h%C3%ADdrico%20en%20nogal.pdf>
- Rodríguez, P., Vega, M., & Cáceres, S. (2018). Agroclimatología aplicada al cultivo de nogales. *Ediciones UNED*.

- Rohm Semiconductor. (2021). *BH1750: Digital 16-bit serial output type ambient light sensor IC for I2C bus interface*. <https://www.Mouser.Com/Datasheet/2/348/Bh1750fvi-e-186247.Pdf>.
- Rueda Toro, W. R. (2018). *SISTEMA DE EXPORTACIONES DE LAS UNIDADES ECONÓMICAS ARTESANALES DE SAN ANTONIO DE IBARRA QUE ELABORAN ARTESANIAS EN MADERA: CASO DE LA UNIDAD ARTESANAL ECONÓMICA DE LA SRA. DOLORES CARRANZA*. <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d2267876-d14f-452d-a6be-2b1c9f48ca61/content>
- Salcedo, E., & Castillo, J. (2021). Mantenimiento y actualización remota en sistemas embebidos aplicados al agro. *Revista Latinoamericana de Sistemas*, 7(2), 40–51.
- Sánchez, P., & Castillo, E. (2020). Parámetros ambientales críticos en agricultura de precisión: selección y validación de sensores. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(3), 112–122.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646.
- Sierra, J., & Bonilla, C. (2021). Aplicaciones de MQTT en sistemas agrícolas inteligentes. *Revista Colombiana de Computación*, 22(1), 78–91.
- Silberschatz, A., Korth, H., & Sudarshan, S. (2019). *Fundamentos de bases de datos* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Solís, J., Medina, D., & Paredes, M. (2021). Sistemas de monitoreo agrícola basados en redes LPWAN: un enfoque práctico. *Revista Avances En Tecnología y Educación*, 7(3), 109–121.
- Sommerville, I. (2016). *Ingeniería del software (10.ª ed.)* (10th ed.). Pearson Educación.
- Sosa-Savedra, J. C., Trejo-Estrella, M. A., García-García, A. L., Barceina-Sánchez, J. D. O., Velázquez-González, R. S., & Hernández-Tovar, R. (2023). Implementación de la

- metodología V como eje de desarrollo de un tribómetro de perno en disco. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 11(Especial4), 21–29.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v11iespecial4.11358>
- Soto, L., Chávez, D., & Martínez, E. (2022). Aplicación de tecnologías IoT en el monitoreo ambiental para la agricultura de precisión. *Revista de Ingeniería Aplicada*, 14(2), 57–64.
- SQLite for the Edge. (2025). Datos sobre el uso de SQLite en dispositivos IoT y edge computing como motor de base de datos embebido. In *The Tiny DB Powering Smart Devices*.
- STMicroelectronics. (2022). STM32F103x8/xB Data Sheet. In <https://www.st.com>.
- UIT. (2012a). *Recomendación UIT-T Y.2060. Descripción general de Internet de los objetos*.
https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDF-S&type=items
- UIT. (2012b). *Recomendación UIT-T Y.2060: Overview of the Internet of Things*. ITU-T.
- Van Schouwen, G., & Ferreyra, R. (n.d.). *Necesidades de agua y manejo de riego en nogales*. Retrieved June 4, 2024, from <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/32615/Articulo?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas, H., & Toledo, D. (2019). Desarrollo de sistemas IoT aplicando ciclo de vida en V: Experiencia en proyectos rurales. *Revista Técnica INGENIUM*, 22(4), 55–67.
- Vásquez, E., & Rivera, R. (2022). Aplicación de LoRaWAN en monitoreo agrícola: estudio de caso en zonas rurales de Ecuador. *Revista I+D Tecnológico*, 18(1), 55–67.
- Vega, P., López, M., & Torres, N. (2019). Sistemas IoT robustos para monitoreo ambiental en campo abierto. *Revista Colombiana de Automatización y Control*, 10(4), 15–26.

- Villamarín, J., & Andrade, M. (2021). Implementación de sistemas IoT para monitoreo remoto usando MQTT y brokers en la nube. *Revista de Ingeniería y Tecnología Aplicada*, 12(3), 23–30.
- Villarraga, M., & Rodríguez, N. (2019). Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de cultivos en zonas rurales. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 33(2), 90–100.
- Villota, E., Rosero, E., Farias, E., Valencia, X., Carvajal, J., & Benalcázar, S. (2024). *PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LA MADERA DE NOGAL, JUGLANS NEOTROPICA DIELS, EN LA PROVINCIA CARCHI, ECUADOR*.
<https://www.ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/9549/14142>
- Walmart. (n.d.). *Anemómetro WH-SP-WS01 para estación meteorológica*.
<https://i5.walmartimages.com/Asr/401f5e5f-89ba-4667-89c8-2f31f06b0d63.E50d2abf1b6ad547034fc217c14a0f99.Jpeg>.

ANEXOS

- Anexo A (publicador.py: Script del nodo sensor para adquisición y publicación de datos)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/publicador.py
- Anexo B (coordinador.py: Script del nodo coordinador para recepción)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_coordinador/coordinador3.py
- Anexo C (calcular_et0_diaria.py: Script que genera el resumen diario de ET₀.)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_coordinador/et0.py
- Anexo D (anemometro.py: Script que gestiona la funcionalidad del sensor Anemómetro)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/anemometro.py
- Anexo E (bh1750.py: Script que gestiona la funcionalidad del sensor bh1750.py)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/bh1750.py
- Anexo F (bme280.py: Script que gestiona la funcionalidad del sensor bme280.py)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/bme280.py
- Anexo G (capacitivo.py: Script que gestiona la funcionalidad del sensor capacitivo 2.0)
https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/capacitivo.py
- Anexo H (ds18b20.py: Script que gestiona la funcionalidad del sensor ds18b20)

<https://github.com/franciscoluis001->

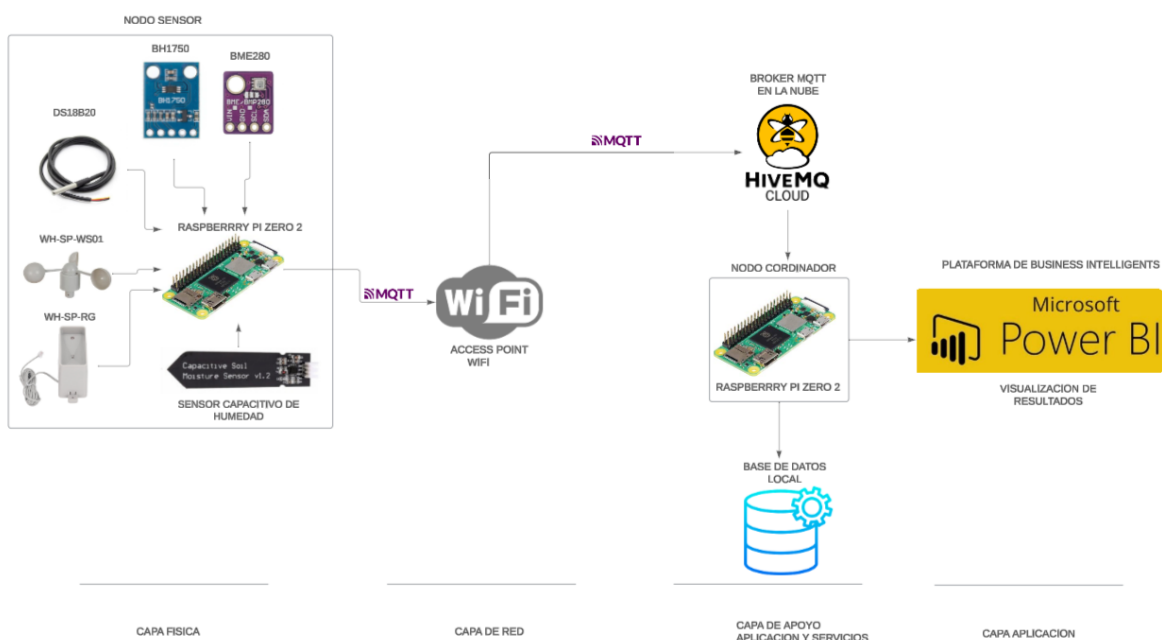
[maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/ds18b20.py](https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/ds18b20.py)

- Anexo I (pluviómetro.py: Script que gestiona la funcionalidad del sensor pluviómetro)

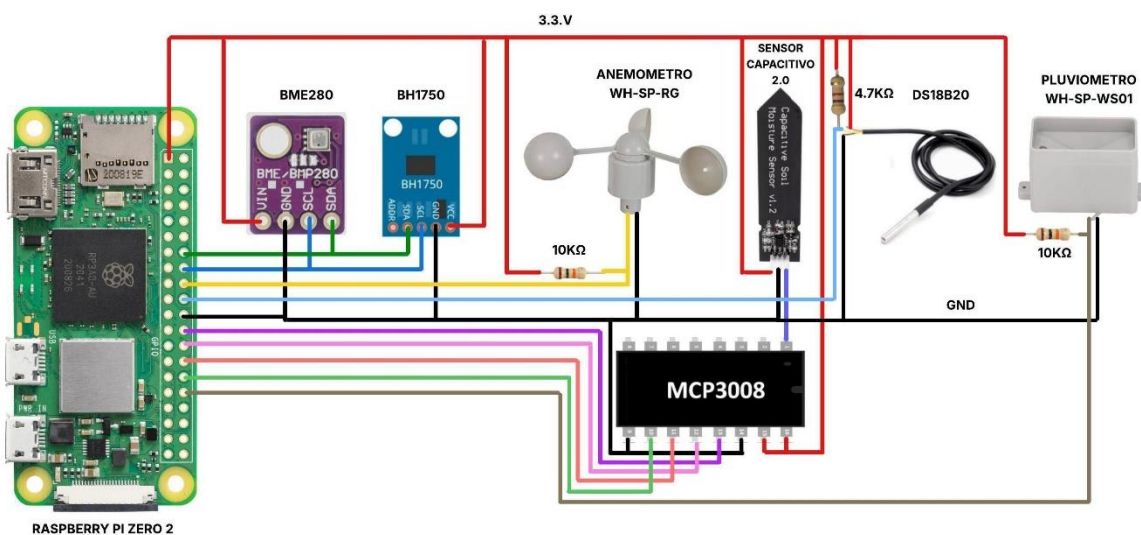
<https://github.com/franciscoluis001->

[maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/pluviometro.py](https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/pluviometro.py)

- Anexo J (Imagen del esquema arquitectónico por capas del sistema IoT.)



- Anexo K (Imagen del esquema eléctrico/electrónico del prototipo)



- Anexo L (Archivo crontab del nodo sensor con las tareas programadas para el arranque del dispositivo)

<https://github.com/franciscoluis001->

[maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/crontab_sensor.txt](https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/crontab_sensor.txt)

- Anexo M (Archivo crontab del nodo coordinador con las tareas programadas para el arranque del dispositivo)

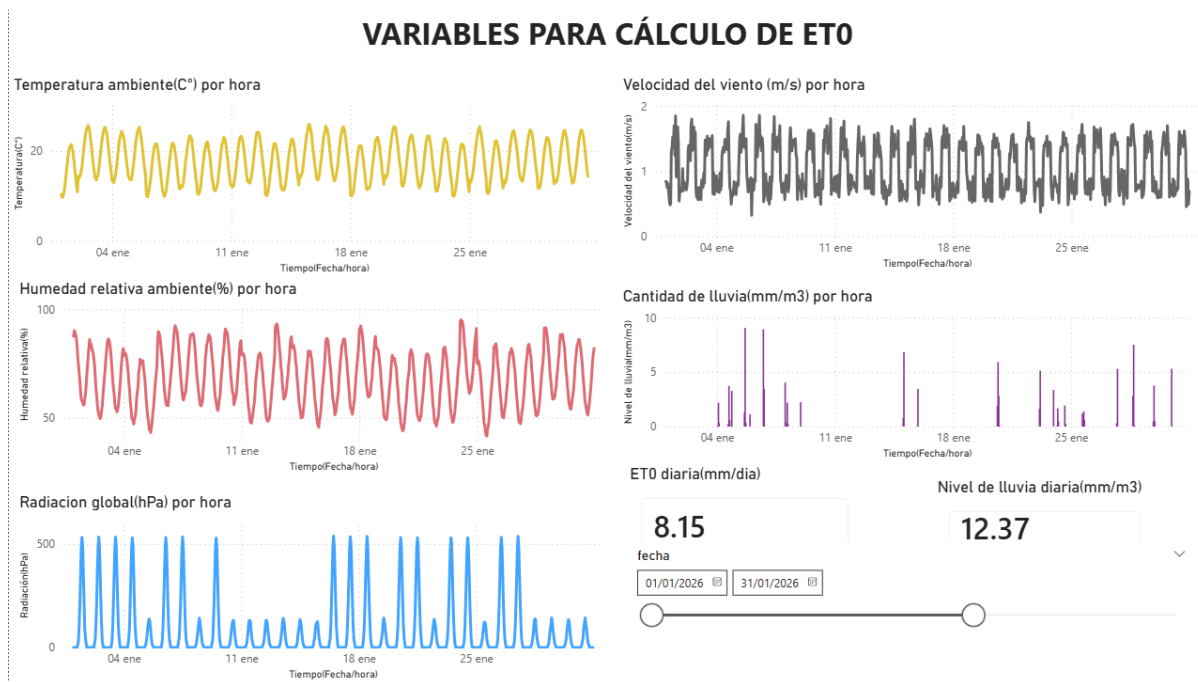
<https://github.com/franciscoluis001->

[maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_coordinador/crontab_coordinador.txt](https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_coordinador/crontab_coordinador.txt)

- Anexo N (Ejemplo del archivo power_bi_unico_horario.csv)

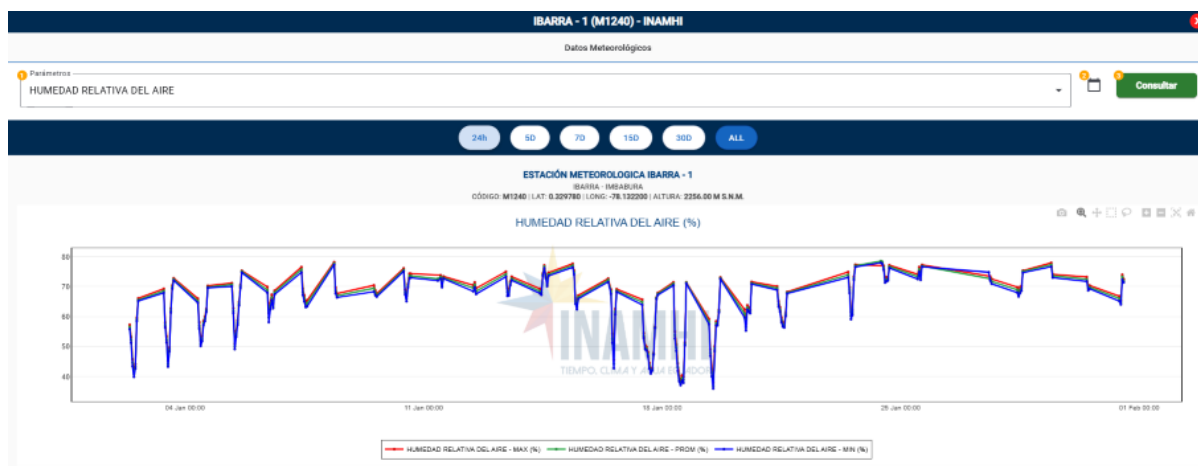
hora	fecha	T_media_hora	HR_media_hora	presion_media_hora	rad_global_media_hora	viento_medio_hora	lluvia_mm_hora	T_suelo_media_hora	H_suelo_media_hora	lluvia_mm_dia	ET0_mm_dia
01/01/2026 00:00	01/01/2026	10.41	87.64	784.02	0.01	0.84	0	8.63	44.07	0	7.195
01/01/2026 01:00	01/01/2026	9.75	90.25	784.02	0.01	0.84	0	8.43	43.71	0	7.195
01/01/2026 02:00	01/01/2026	9.68	89.24	783.69	0.01	0.75	0	8.55	43.34	0	7.195
01/01/2026 03:00	01/01/2026	10.27	88.23	783.71	0.01	0.81	0	8.77	42.96	0	7.195
01/01/2026 04:00	01/01/2026	10.85	86.52	783.94	0.01	0.7	0	8.53	42.55	0	7.195
01/01/2026 05:00	01/01/2026	11.85	83.01	784.57	0.01	0.57	0	8.4	42.17	0	7.195
01/01/2026 06:00	01/01/2026	13.35	78	784.14	13.5	0.48	0	8.26	41.75	0	7.195
01/01/2026 07:00	01/01/2026	14.85	74.41	784.02	37.74	0.49	0	8.82	41.29	0	7.195
01/01/2026 08:00	01/01/2026	16.42	70.64	783.9	111.73	1.3	0	9.58	40.82	0	7.195
01/01/2026 09:00	01/01/2026	17.79	66.72	783.74	206.12	1.37	0	10.62	40.26	0	7.195
01/01/2026 10:00	01/01/2026	19.09	61.71	783.63	349.56	1.53	0	11.99	39.68	0	7.195
01/01/2026 11:00	01/01/2026	20.32	58.96	784.25	483.9	1.39	0	13.37	38.99	0	7.195
01/01/2026 12:00	01/01/2026	20.82	57.65	784.14	532.07	1.7	0	14.86	38.21	0	7.195
01/01/2026 13:00	01/01/2026	21	57.23	783.82	486.65	1.24	0	16.36	37.44	0	7.195
01/01/2026 14:00	01/01/2026	21.49	55.92	783.93	358.69	1.85	0	17.43	36.74	0	7.195
01/01/2026 15:00	01/01/2026	21.16	56.11	783.59	221.08	0.91	0	18.24	36.06	0	7.195
01/01/2026 16:00	01/01/2026	20.24	58.91	783.83	86.9	1.33	0	18.88	35.36	0	7.195
01/01/2026 17:00	01/01/2026	19.33	61	783.66	50.67	1.68	0	19.6	34.75	0	7.195
01/01/2026 18:00	01/01/2026	17.8	65.53	783.71	15.53	1.44	0	19.71	34.24	0	7.195
01/01/2026 19:00	01/01/2026	16.29	70.48	784.34	0.01	0.54	0	19.48	33.69	0	7.195
01/01/2026 20:00	01/01/2026	14.89	74.68	784.11	0.02	0.68	0	18.46	33.2	0	7.195
01/01/2026 21:00	01/01/2026	13.33	79.47	783.66	0.01	0.74	0	17.19	32.79	0	7.195
01/01/2026 22:00	01/01/2026	11.98	83	783.9	0.01	0.73	0	15.97	32.43	0	7.195
01/01/2026 23:00	01/01/2026	10.9	86.15	783.83	0.01	0.69	0	14.73	32.08	0	7.195
02/01/2026 00:00	02/01/2026	14.37	82.77	784.14	0.01	1.04	0	13.49	31.66	0	7.918
02/01/2026 01:00	02/01/2026	13.7	84.13	784.28	0.01	0.7	0	12	31.23	0	7.918
02/01/2026 02:00	02/01/2026	14.36	82.03	783.98	0.01	0.84	0	10.5	30.79	0	7.918
02/01/2026 03:00	02/01/2026	14.54	80.82	783.79	0.01	0.75	0	11.41	30.32	0	7.918
02/01/2026 04:00	02/01/2026	15.36	79.95	783.84	0.01	0.8	0	12	29.83	0	7.918
02/01/2026 05:00	02/01/2026	16.15	76.88	784.2	0.01	0.71	0	12.25	29.34	0	7.918
02/01/2026 06:00	02/01/2026	17.41	73.84	784.26	20.69	0.75	0	12.82	28.85	0	7.918
02/01/2026 07:00	02/01/2026	18.99	68.86	783.88	42.5	0.86	0	13.39	28.27	0	7.918
02/01/2026 08:00	02/01/2026	20.66	62.91	783.69	112.6	1.35	0	14.22	27.59	0	7.918
02/01/2026 09:00	02/01/2026	22.02	60.49	783.6	215.97	1.4	0	15.16	26.87	0	7.918
02/01/2026 10:00	02/01/2026	23.43	55.87	783.92	369.55	1.25	0	16.01	26.12	0	7.918
02/01/2026 11:00	02/01/2026	24.21	52.84	784.56	479.97	1.16	0	17.57	25.28	0	7.918
02/01/2026 12:00	02/01/2026	25	51.48	783.78	534.21	1.72	0	18.95	24.34	0	7.918
02/01/2026 13:00	02/01/2026	25.21	50.38	783.64	489.06	1.8	0	20.59	23.38	0	7.918

- Anexo O (Capturas o interfaz de visualización en Power BI (panel o mapa generado).)

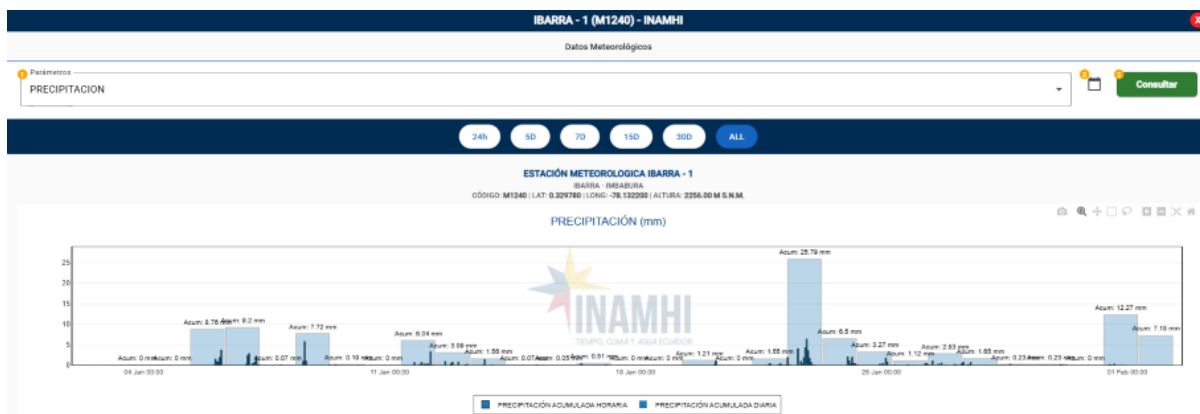


- Anexo P (Comandos para creación y acceso al entorno virtual)
 - https://github.com/franciscoluis001-maker/evapotranspiracion/blob/main/nodo_sensor/entorno_virtual.txt
- Anexo Q (Gráficas tomadas del visor web de la INAMHI-Estacion Meteorológica Ibarra M1240)

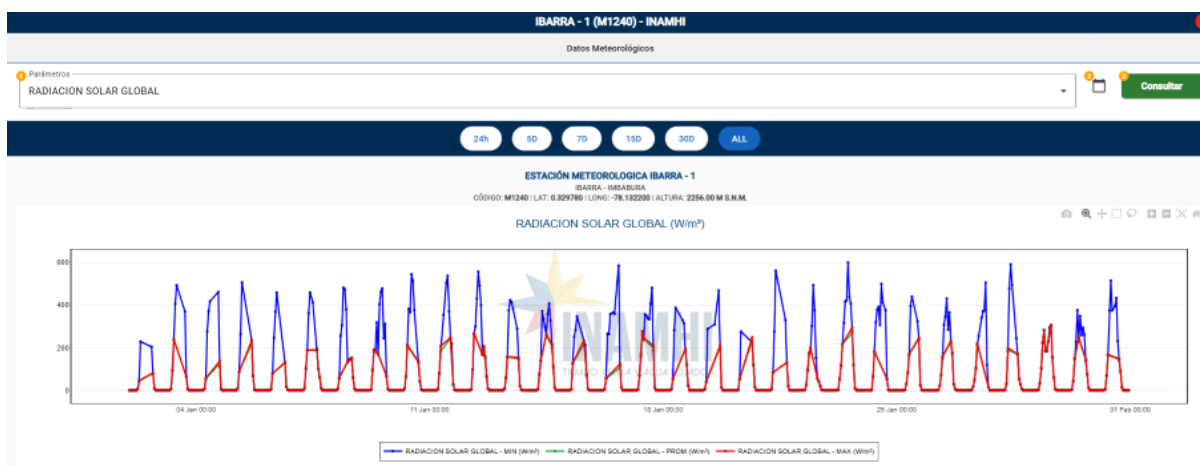
1. Humedad Relativa del Aire



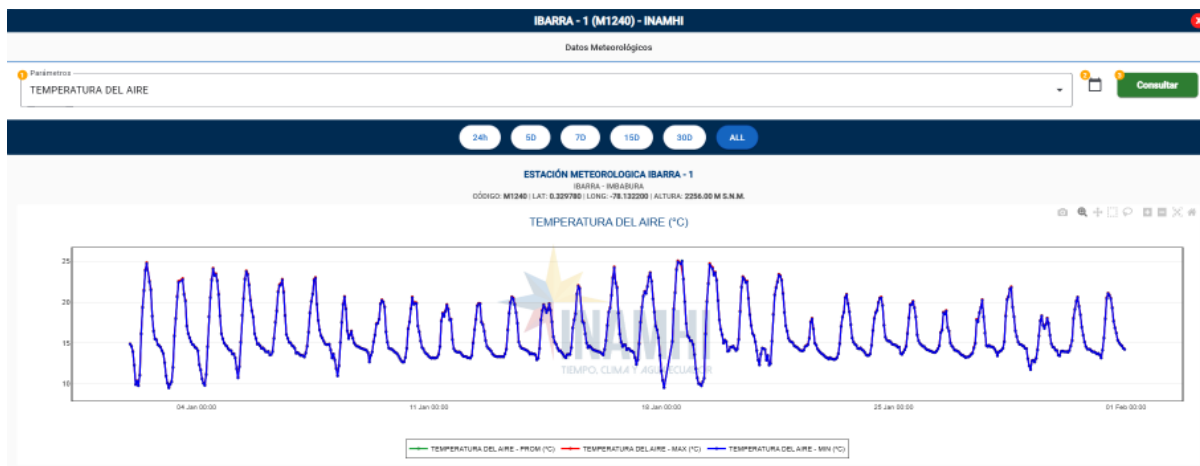
2. Precipitación



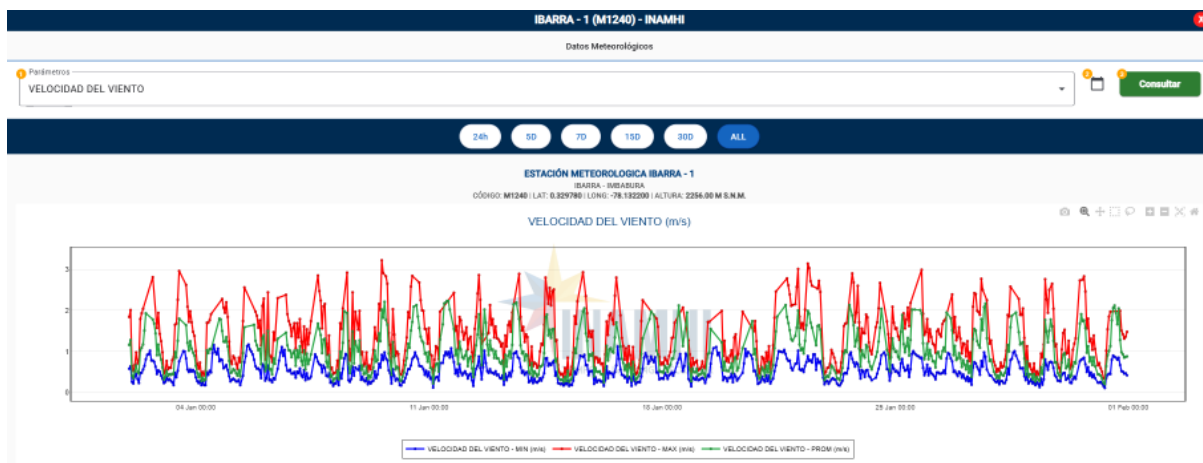
3. Radiación Solar



4. Temperatura del aire



5. Velocidad del aire



6. Presión atmosférica

