

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TEMA:**

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN - APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE  
INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E  
INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN SOLUCIONES PARA LA  
INDUSTRIA 4.0**

**SUB – TEMA:**

**DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA IOT PARA EL MONITOREO  
DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO**

**PRESENTADO POR:**

**ALAS MEJÍA, ÁNGEL ALEJANDRO  
BENAVIDES TEJADA, LUIS ENRIQUE  
PAIZ JUÁREZ, WALTER ORLANDO**

**PARA OTORGAR EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2025**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL:

**LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

SECRETARIO:

**ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR:

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título:

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN - APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE  
INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E  
INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE  
EN SOLUCIONES PARA LA INDUSTRIA 4.0**

Subtítulo:

**DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA IOT PARA EL MONITOREO  
DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO**

Presentado por:

**ALAS MEJÍA, ÁNGEL ALEJANDRO  
BENAVIDES TEJADA, LUIS ENRIQUE  
PAIZ JUÁREZ, WALTER ORLANDO**

SAN SALVADOR, JULIO 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**PhD. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ**

## NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, martes 11 de marzo de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle  
Director Interino

  
Firma

  
Firma



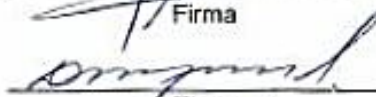
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

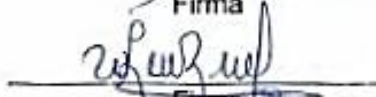
- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ  
(Docente Asesor)

  
Firma

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE

  
Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación (Curso de Especialización): APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN SOLUCIONES PARA LA INDUSTRIA 4.0

A cargo de los Bachilleres:

- ÁNGEL ALEJANDRO ALAS MEJÍA
- LUIS ENRIQUE BENAVIDES TEJADA
- WALTER ORLANDO PAIZ JUÁREZ

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

( Ocho punto uno )

8.1

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por poner en mi vida a dos grandes mentores: mis padres, Lucía y Ángel. Agradezco profundamente su amor y paciencia durante este largo camino llamado vida.

Mamá, gracias por tu amor incondicional. Tus palabras han sido mi guía. Lo que no tuviste, te has esforzado porque mis hermanos y yo lo tengamos. Tus consejos han sido oro entre tus labios, y haber llegado hasta aquí es, sin duda, fruto de tu dedicación, entrega y sacrificio.

Papá, gracias por tu apoyo incondicional en mis estudios, por estar siempre presente. Aun con tu seriedad, me has demostrado, con hechos, el gran amor que tienes hacia mí y hacia mis hermanos.

Agradezco a mis compañeros y amigos formados a lo largo de la etapa universitaria, quienes fueron incondicionales en la realización de las diversas actividades académicas. Gracias por esas horas compartidas de estudio, por su compañerismo, y a aquellos que se convirtieron en maestros al compartir el conocimiento que adquirirían en su preparación para las evaluaciones. Agradezco al Ingeniero Werner Meléndez por su invaluable orientación, dedicación y apoyo constante. Gracias también por haber servido de enlace con el Ingeniero Erick Guardado, quien aportó la idea y la necesidad de implementar una tómbola de fermentación de cacao mediante el uso de tecnología IoT, para el monitoreo en tiempo real de temperatura, humedad y pH, principales variables que intervienen en el proceso de fermentación del cacao.

Gracias al PhD Carlos Pocasangre, nuestro docente asesor, por sus valiosos aportes y comentarios que enriquecieron significativamente esta investigación.

Extiendo mi agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, por proporcionar los sensores y microprocesadores utilizados en el fermentador de tambor giratorio, y a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, por donar las soluciones buffer para la calibración del sensor de pH, así como el fermentador utilizado en este proyecto.

Finalmente, agradezco a todos quienes, de una u otra forma, formaron parte de este camino. Cada gesto, cada palabra, y cada acompañamiento fueron esenciales para alcanzar esta meta. Horas frente a un papel pensando...

**ALAS MEJÍA, ANGEL ALEJANDRO**

## **AGRADECIMIENTOS**

La culminación de esta etapa de mi vida quiero agradecerla a Dios y a cada persona que tuvo la bondad de aportar con su ayuda para que no desistiera del proceso. Quiero dedicar este logro especialmente a mi preciada y amada madre, Marleni Tejada, ya que sin su ayuda habría sido imposible llegar hasta este punto. De verdad, muchas gracias por creer en mí, por alentarme y apoyarme a pesar de todas las carencias y necesidades que tuviste. Muchas gracias.

Agradezco también a mi padre, Luis Benavides, quien siempre estuvo pendiente de mis avances en la carrera. También sin su ayuda no habría sido posible obtener este logro. Muchas gracias.

Agradezco mucho a mi hermano, Christian Benavides, quien siempre estuvo dispuesto a apoyarme en lo que necesitaba y nunca me lo negó. Muchas gracias.

A mi entonces novia y ahora esposa, Guissele Pérez, quiero expresarte toda mi gratitud por apoyarme y darme fuerzas para no rendirme en tantos momentos difíciles que tú me viste atravesar y que solo tú conoces. También quiero agradecerte por todo lo que hiciste por mí en tiempos de pandemia. Siempre lo voy a decir... me salvaste la vida con tus cuidados y compañía. Gracias, y espero tenerte por mucho tiempo, mi amor.

Agradezco también a todas mis tías y tíos, primos y primas, quienes nunca nos negaron su ayuda, tanto a mí como a mi madre y hermano. Quiero agradecerles en nombre de ellos y disculparme por todas las molestias que pudimos ocasionar. Muchas gracias.

Por supuesto, agradezco a mis buenos y mejores amigos Matute Gálvez, Mario Ibáñez y David Orozco por cada noche de estudio compartida y los momentos de alegría. Muchas gracias por toda su ayuda. Les deseo muchos éxitos en sus vidas.

Agradezco también a mis compañeros de trabajo de grado por toda su disposición y colaboración para hacer posible este logro. Les deseo muchos éxitos en sus vidas.

**BENAVIDES TEJADA, LUIS ENRIQUE**

## **AGRADECIMIENTOS**

La finalización de esta etapa académica de mi vida fue posible y la debo agradecer a la ayuda de Dios, mi familia, amigos, compañeros y docentes que estuvieron ahí en este viaje de altos y bajos.

Deseo agradecer a mi padre y madre cuyos sacrificios permitieron que pudiera llegar hasta este importante momento, dos personas muy sabias que mediante ejemplo, consejos, regaños y aliento forjaron mi carácter para nunca darme por vencido y siempre buscar la superación personal. Agradezco a mi tía quien siempre nunca dudó en ayudarme en cualquier cosa que necesitara. A mis hermanos que siempre estuvieron pendientes y que fueron una gran fuente de ayuda en distintas ocasiones.

Gracias totales a mis amigos y compañeros que siempre estuvieron dispuestos a ayudar tanto académica como emocionalmente, así como por todos los momentos compartidos.

**PAIZ JUÁREZ, WALTER ORLANDO**

## CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
INTRODUCCIÓN.....	7
OBJETIVOS.....	8
GENERAL .....	8
ESPECÍFICOS .....	8
ALCANCES.....	9
ANTECEDENTES.....	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
JUSTIFICACIÓN.....	12
CAPÍTULO 1: BASE TEÓRICA.....	13
1.1 FERMENTACIÓN DEL CACAO .....	13
1.2 MÉTODOS DE FERMENTACIÓN DEL CACAO .....	13
1.2.1 Fermentación en sacos.....	13
1.2.2 Fermentación en montones.....	14
1.2.3 Fermentación en Cajón.....	15
1.2.4 Fermentación en Tambor Rotatorio.....	17
1.3 PARÁMETROS DE INTERÉS EN LA FERMENTACIÓN DEL CACAO.....	18
1.3.1 Temperatura.....	18
1.3.2 pH .....	18
1.3.3 Humedad relativa.....	19
1.4 ZONAS DE CULTIVO DE CACAO EN EL SALVADOR.....	19
1.4 Internet de las Cosas (IoT).....	25
1.4.1. Concepto de IoT .....	25

1.4.2. Aplicaciones de IoT en agricultura (Agricultura 4.0).....	26
1.5 Dispositivos y Tecnologías Utilizadas .....	28
1.5.1. Microcontroladores ESP.....	29
1.5.2. Comunicación Inalámbrica con LoRa .....	31
1.5.2.1. ¿Qué es LoRa?.....	31
1.5.2.2. Aplicación de LoRa en IoT .....	31
1.5.2.3. Predicción de cobertura teórica .....	33
1.5.2.4. Pruebas prácticas de cobertura .....	34
1.5.3. Sensores utilizados .....	35
1.5.4. Plataforma de recolección o visualización de datos .....	38
1.5.5. Protocolo de comunicación MQTT .....	39
1.5.6. Router LTE y conectividad celular.....	39
1.5.7. Sistema de alimentación eléctrica.....	41
1.5.8. Alternativas de comunicación inalámbricas consideradas .....	43
CAPÍTULO 2: IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA.....	45
2.1. Ensamblaje del sistema.....	45
2.2. Programación y configuración .....	48
2.3. Ajustes y mejoras realizadas.....	50
2.3.1. Calibración del sensor de pH.....	50
2.3.2. Comparación del sensor de temperatura y humedad con instrumento de precisión: .....	51
2.3.3. Ajuste de parámetros LoRa .....	53
2.3.4. Manejo de errores y reinicios automáticos.....	55
2.4. Pruebas de funcionamiento en entorno controlado.....	57
CAPÍTULO 3: RESULTADOS .....	61

CONCLUSIONES.....	67
RECOMENDACIONES .....	68
REFERENCIAS .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Descripción de las placas ESP32 utilizadas</i> .....	30
Tabla 2 <i>Factores de propagación en envíos de datos</i> .....	33
Tabla 3 <i>Características de los sensores de temperatura (SHT30), y pH (PH4502C)</i> .....	37
Tabla 4 <i>Características del router Huawei B311-221</i> .....	41
Tabla 5 <i>Especificaciones de batería con celda 18650</i> .....	42
Tabla 6 <i>Características del sensor de precisión HH414</i> .....	52
Tabla 7 <i>Tabla comparativa entre sensor de precisión HH414 y sensor SHT30</i> .....	53
Tabla 8 <i>Ejemplo de los datos registrados por el prototipo IoT</i> .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Granos de cacao fermentados en sacos de yute .....	14
Figura 2	Granos de cacao en montones recién extraídos de las mazorcas .....	15
Figura 3	Fermentador de granos de cacao tipo cajón contruidos de madera .....	16
Figura 4	Fermentador de granos de cacao de cajón tipo escalera .....	16
Figura 5	Fermentador tipo tambor rotatorio .....	17
Figura 6	Zonas delimitadas de siembra según tipo de producto.....	20
Figura 7	Distribución de nodos para posibles puntos de instalación de monitoreo .....	21
Figura 8	Producción anual de grano de cacao en toneladas en El Salvador.....	22
Figura 9	Libras de cacao fermentado por departamento .....	23
Figura 10	Libras de cacao fermentado por municipio Dpto. de La Paz .....	23
Figura 11	Libras de cacao fermentado por municipio Dpto. de San Vicente.....	24
Figura 12	Libras de cacao fermentado por municipio Dpto. de Usulután.....	24
Figura 13	Mapa de ubicación de fincas de cacao salvadoreñas .....	25
Figura 14	Diagrama en bloques del sistema IoT propuesto .....	28
Figura 15	Imagen del dispositivo ESP32 .....	30
Figura 16	Imagen del dispositivo ESP32 usado como nodo IOT.....	31
Figura 17	Prueba de recepción de datos mediante analizador de espectro.....	34
Figura 18	Sensor de Temperatura y Humedad FS400-SHT30.....	36
Figura 19	Sensor PH4502C, diagrama de pines del sensor PH4502C .....	37
Figura 20	Captura de pantalla del panel de visualización de variables de Thingsboard®.	39
Figura 21	Router Huawei B311-221 .....	40
Figura 22	Batería RXIN con celda 18650 .....	42
Figura 23	Gabinete para el nodo IOT.....	46
Figura 24	Sensor de temperatura y humedad SHT30.....	47
Figura 25	Sensor de pH PH4502C instalado en el interior de la tómbola.....	47
Figura 26	Diagrama de comunicación entre dispositivos del sistema IoT .....	48
Figura 27	Sección de código en el ESP32 nodo para inicializar el radio LoRa.....	49
Figura 28	Inicialización de radio LoRa del ESP32 en el Gateway .....	49
Figura 29	Sección de código en el ESP32 Gateway.....	50
Figura 30	Soluciones buffer de pH utilizados para la calibración del sensor de pH.....	51

Figura 31	Sensor de temperatura de precisión HH414 utilizado como referencia.....	52
Figura 32	Flujograma de la programación del ESP32 nodo con sensores .....	55
Figura 33	Flujograma de la programación del ESP32 Gateway .....	56
Figura 34	Extracción de las semillas de las mazorcas de cacao.....	57
Figura 35	Pruebas de la cantidad de azúcar en la baba de cacao.....	58
Figura 36	Fin del proceso de extracción de mazorcas de cacao.....	58
Figura 37	Semillas de cacao luego de su extracción de la tómbola .....	59
Figura 38	Temperatura interna del tambor y Temperatura interna del cacao .....	61
Figura 39	Gráfico de Temperatura vs tiempo de Fermentación.....	62
Figura 40	Gráfico de pH vs tiempo de Fermentación .....	63
Figura 41	Gráfico de Temperatura vs pH.....	64
Figura 42	Diagrama de correlación para: temperatura, pH y humedad relativa.....	65
Figura 43	Diagrama de dispersión de las variables: temperatura, pH y humedad relativa	66

## Glosario

**Cacao:** Planta tropical cuyo fruto se usa para la producción de chocolate y otros derivados. Su proceso de fermentación es clave para desarrollar sus sabores y aromas.

**Fermentación:** Proceso bioquímico en el que microorganismos descomponen sustancias orgánicas, generando compuestos como ácidos, gases o alcoholes. En el cacao, la fermentación mejora su sabor y calidad.

**Caja Rohan:** Contenedor utilizado en la fermentación del cacao, diseñado para facilitar la aireación y el drenaje de líquidos, mejorando la calidad del grano.

**Ph:** Medida de acidez o alcalinidad de una sustancia en una escala de 0 a 14. En el cacao, influye en el sabor y en el proceso de fermentación.

**Aeróbico:** Proceso que requiere oxígeno para llevarse a cabo, como la fermentación aeróbica del cacao, donde los microorganismos descomponen la pulpa en presencia de oxígeno.

**Anaeróbico:** Proceso que ocurre sin la presencia de oxígeno, como ciertos tipos de fermentación del cacao, que pueden influir en el perfil de sabor del grano.

**ESP32:** Microcontrolador de bajo consumo con Wi-Fi y Bluetooth integrado, usado en proyectos de IoT y automatización.

**MQTT (Message Queuing Telemetry Transport):** Protocolo de comunicación ligero diseñado para dispositivos IoT, ideal para redes de baja potencia y ancho de banda limitado.

**HTTP (Hypertext Transfer Protocol):** Protocolo de comunicación que permite la transferencia de datos en la web, utilizado en aplicaciones IoT para enviar y recibir información.

**IOT (Internet of Things):** Conjunto de dispositivos interconectados que recopilan y transmiten datos a través de internet, permitiendo la automatización y el monitoreo remoto.

**Thingsboard®:** Plataforma open-source para IoT que permite la recopilación, visualización y análisis de datos de sensores y dispositivos conectados.

**Lora (Long Range):** Tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo, usada en IoT para la transmisión de datos a grandes distancias.

**Gateway:** Dispositivo que actúa como puente entre diferentes redes, facilitando la comunicación entre dispositivos IoT y servidores en la nube.

## INTRODUCCIÓN

La fermentación es una etapa esencial en la producción del grano de cacao, ya que determina en gran medida la calidad, el sabor y las características sensoriales del producto final. En El Salvador, lo usual es que este tipo de procesos se gestione de manera empírica, basados en la experiencia del productor, lo que puede resultar en inconsistencias en las condiciones de fermentación. Las nuevas tecnologías, como el Internet de las Cosas (IoT) ofrecen posibilidades para mejorar estos procesos, lo que redundaría en la mejora de la eficiencia y la calidad en la producción de cacao y sus derivados.

Las IoT permiten la conexión y comunicación remota entre diferentes dispositivos y sensores, facilitando el monitoreo en tiempo real de las variables ambientales que intervienen en diferentes procesos. Estos dispositivos pueden recolectar datos precisos (por ejemplo) de temperatura, humedad, pH y otros parámetros relevantes, proporcionando una visión detallada y actualizada del estado de la cadena de producción. Además, la adquisición y el almacenamiento de datos, permite su análisis mediante diversas técnicas que facilitan la adopción de estrategias efectivas para el control y supervisión del proceso de fermentación, lo que se le conoce como Ciencia de los Datos (Amazon Web Services, 2024).

La presente investigación propone analizar el impacto y el potencial de las tecnologías IoT en la postcosecha de cacao. El sistema de monitoreo basado en IoT podría mejorar la eficacia del proceso y los registros de datos, con un enfoque particular en el almacenamiento constante de parámetros en cada uno de los eslabones para optimizar el desarrollo de la cadena de valor y construir patrones característicos con estos datos para saber de antemano si la fermentación será óptima o no.

Los desafíos y barreras que pueden surgir al adoptar estas tecnologías (IoT) en el contexto específico de la industria del cacao van desde la conectividad limitada en áreas rurales hasta la capacitación necesaria para utilizar y mantener estos sistemas, lo que se debe considerar para una implementación exitosa.

El fin de este proyecto es proponer un sistema de comunicación IoT que permita la transmisión de la información y el monitoreo de variables de temperatura, pH y humedad relativa, en tiempo real por medio de la plataforma Thingsboard® con almacenamiento de los datos en la nube, y mejorar los procesos productivos agrícolas, tomando en cuenta los desafíos de los pequeños y medianos productores.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Implementar una infraestructura para un sistema de comunicación IoT que permita la medición y transmisión de datos para el monitoreo de temperatura, pH y humedad relativa en tiempo real para el proceso de fermentación del cacao, dentro de un fermentador de tipo tambor giratorio.

### **ESPECÍFICOS**

- Diseñar un sistema IoT capaz de establecer la transmisión de datos en tiempo real por medio de sensores de temperatura, pH y humedad relativa hacia la nube.
- Desarrollar la infraestructura de montaje para la instalación y protección de componentes electrónicos como microcontroladores y sensores que permitan el funcionamiento del sistema IoT.
- Integrar la tecnología LoRa en el diseño de la infraestructura IoT para la transmisión de datos a larga distancia utilizando componentes de bajo consumo energético.
- Presentar evidencias de los datos en tiempo real en la plataforma Thingsboard® para el monitoreo constante de las variables de interés en el proceso de fermentación del cacao.
- Comparar estadísticamente los resultados obtenidos de la infraestructura de monitoreo IoT, con estudios similares de procesos de fermentación del grano de cacao.

## ALCANCES

1. Realizar el montaje físico de los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento de la infraestructura IoT, en el cual se integran sensores de temperatura, pH y humedad relativa instalados en la cámara interna del fermentador de tambor giratorio, microcontroladores ESP32 con tecnología LoRa, sistema de autonomía energético mediante batería externa instalados en una caja hermética de PVC.
2. Desarrollar un algoritmo de trabajo en Python como lenguaje de programación de alto nivel, que permita integrar las lecturas de los sensores instalados en la cámara interna del fermentador, y transmitirlos de forma inalámbrica con ayuda de un microcontrolador ESP32 (transmisor Tx) con tecnología Wifi LoRa hacia otro ESP32 (receptor Rx).
3. Realizar el set up de los microcontroladores ESP32 con tecnología Wifi LoRa de manera que se logre mantener la comunicación entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) para garantizar que el enlace se pueda llevar a cabo en umbrales de potencia aceptables y en la frecuencia de transmisión permitida en el país.
4. Desarrollar un algoritmo de trabajo en Python que permita al ESP32 (Rx/Gateway), transmitir la información a la nube, mediante una conexión LTE utilizando un router de tal forma que puedan ser visualizados en tiempo real, con ayuda de dashboards de la plataforma Thingsboard®.

## ANTECEDENTES

El Salvador empezó a tener los primeros proyectos de aplicación de tecnologías de IoT orientados a las áreas de agricultura, ganadería y ciudades inteligentes hace aproximadamente 10 años, donde sectores de educación superior como la Universidad Don Bosco o ITCA FEPADE (Gámez López, 2018) lanzaron proyectos piloto para integrar sensores con microcontroladores a placas como Arduino para monitoreo de variables ambientales o tareas básicas de domótica en el caso de control de climatización, iluminación o encendido y apagado de electrodomésticos, interconectados a su vez con redes de comunicación inalámbrica como el Wifi y GSM.

Uno de los componentes clave de la UDB es la transferencia tecnológica con el sector empresarial, industrial, gubernamental y organismos de cooperación, nacional e internacional; entre ellos cuentan proyectos desarrollados para el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) para su proyecto GENSAL, entre otras (Universidad Don Bosco, 2019).

El primer caso documentado de proyecto piloto IoT orientado a la agricultura denominado “Smart Agro” tuvo lugar en Guatajiagua, Morazán. Con el apoyo del proveedor de Servicios Tecnológicos (SIGEL) se instalaron las soluciones de Internet de las Cosas (IoT) y Big Data. El equipo instalado fue una estación meteorológica, con dos sondas y tres sensores de humedad de suelo para los cultivos de pimientos, pepino, tomate y papaya de la cooperativa (La Prensa Gráfica, 2016).

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El proceso de fermentación del grano de cacao en El Salvador se realiza principalmente de manera empírica, en base a recomendaciones de organizaciones del sector cacaotero en el caso de pequeños y medianos productores comerciantes, los cuales a través de los años han mejorado los métodos y formas de realizar el proceso de fermentación, sin embargo, son pocos o se carece de procedimientos de fermentación de precisión estandarizados que incluyan la recopilación de datos en cuanto a las variables que intervienen en el proceso de fermentación.

Durante los últimos años en El Salvador, el sector de producción cacaotero ha crecido de manera paulatina, de forma que cada vez más agricultores apuestan por el cultivo del cacao con miras a su comercialización en sus diferentes presentaciones, es decir, el grano de cacao como tal, o sus derivados, chocolate en polvo, tabletas o aceites. La propuesta para mejorar la calidad del cacao como producto final se logra mediante un proceso de fermentación preciso que asegure que al culminar el proceso de fermentación satisfaga los estándares de calidad en cuanto a su sabor y aroma característicos.

Por tanto, para lograr procedimientos de fermentación precisos y refinados no basta con los procesos empíricos y cotidianos, sino es necesario, el seguimiento del proceso de fermentación a través de recolección de datos de las variables que intervienen en el proceso de fermentación, siendo las principales la temperatura, pH y humedad relativa. Para ello, se pretende implementar una infraestructura de monitoreo en tiempo real de los parámetros de interés utilizando una combinación de tecnologías actuales, como lo son sensores, microcontroladores y dispositivos de IoT que permitan la transmisión de la información hacia la nube, y poder evaluar patrones, perfiles y análisis de datos del proceso de fermentación, con la finalidad de recabar datos que ayuden a mejorar la calidad del producto final.

El sistema de monitoreo IoT que se pretende instalar en un fermentador tipo tambor giratorio, es escalable para cualquier tipo de fermentador tradicional, por tanto, se puede implementar sin ningún problema. En resumen, la propuesta del sistema de monitoreo IoT pone las bases en cierto modo, para la estandarización de procesos de fermentación más precisos y confiables, mediante la recolección de datos y abre las puertas a mejores prácticas de post cosecha del grano de cacao.

## JUSTIFICACIÓN

La implementación del sistema IoT para el monitoreo del proceso de fermentación del cacao abre puertas de investigación y mejora continua para consolidar procedimientos, estándares de procesos y métodos para mejorar la calidad de un bien, un producto o un servicio, en este caso la importancia radica en la recolección de datos de las variables de interés, para la producción de bienes derivados del cacao y con ello poder refinar y controlar procesos futuros de fermentación con mayor fiabilidad.

Implementar el sistema IoT de monitoreo de variables para el monitoreo del proceso de fermentación del cacao, ofrece la oportunidad de aplicar nuevas formas de generar emprendimientos comerciales, productivos y de negocios, brindar asesorías y alternativas de procesos empíricos a procesos semiautomatizados o completamente automatizados.

Los datos obtenidos del sistema IoT de monitoreo puede ser la base para desarrollar algoritmos de *machine learning*, aplicar análisis de datos y generar información clave en cualquier proceso de manufactura, producción de un bien o servicio. Por otro lado, es importante señalar que la propuesta del sistema de monitoreo IoT se vuelve multidisciplinario al combinar muchas ramas de estudio implicadas ampliando las posibilidades de aplicación y análisis.

## **CAPÍTULO 1: BASE TEÓRICA**

### **1.1 FERMENTACIÓN DEL CACAO**

La calidad del cacao está muy ligada al proceso de fermentación. Una fermentación bien ejecutada produce un cacao que, al ser convertido en chocolate, resulta agradable al paladar y al olfato. En contraste, una mala fermentación o la ausencia de este proceso pueden deteriorar notablemente la calidad del producto final (Lambert, 2013). Existen desafíos que pueden afectar la eficiencia de la fermentación, como la falta de mano de obra especializada y recursos tecnológicos adecuados. Especialmente cuando se trata de producciones pequeñas de cacao. Asimismo, las debilidades en los procesos de postcosecha son trasladadas a los eslabones de la cadena de valor del cacao.

Existen diversos factores ambientales que afectan la calidad del grano de cacao, según (Wilches, 2023), los de mayor importancia son: temperatura (18 °C a 32 °C), pluviosidad (400 a 1100 pulgadas por año), y otros asociados como la velocidad del viento, plagas, madurez del cacao, cantidades, etc. En cuanto al proceso de fermentación, los más relevantes son: la temperatura interna del proceso (la ideal oscila entre 40°C a 45°C en las primeras 48 horas de fermentación), además, influye mucho las condiciones de aireación. Los niveles de acidez o alcalinidad, pH (los niveles óptimos de pH para la producción de precursores de sabor y aroma en el cacao se encuentran entre 4.7 y 5.2).

### **1.2 MÉTODOS DE FERMENTACIÓN DEL CACAO**

#### **1.2.1 Fermentación en sacos**

Se usan sacos de polietileno o yute, en estos se colocan los granos (ver Figura 1), se cierran y posteriormente son cubiertos con un plástico u hojas de plátano para conservar la temperatura que se genera al interior en los granos. Aunque también puede dejar colgando el saco para una mejor aeración. En este proceso, se sacude los sacos para realizar el procedimiento de volteos.

## Figura 1

Granos de cacao fermentados en sacos de yute



*Nota.* La figura muestra los granos de cacao dentro de los sacos de yute, antes de cerrarlos para empezar el proceso de fermentación. Tomado de PBI Colombia. (2017, 11 de mayo)

### 1.2.2 Fermentación en montones

Consiste en colocar los granos de cacao encima de un tendedero, ya sea de hojas de plátano (ver Figura 2), esteras de madera que tengan espacios suficientes para el vertimiento del mucílago y después se cubre con plástico o también con hojas de plátano. Se busca evitar una fuga de calor y también facilitar el drenaje del exudado (Teneda Llerena, 2016).

Los montones no deben estar expuestos directamente al sol, por eso se construyen cobertizos cuya base estará aproximadamente a 80 cm del suelo. Las remociones se efectuarán a intervalos de 48, 72 y 96 horas, para tener un cacao bien fermentado (por encima del 90 %).

**Figura 2**

Granos de cacao en montones recién extraídos de las mazorcas



*Nota.* La figura muestra los granos de cacao sobre hojas de huerta, listos para su envoltura. Tomado de (Cadenacacaoca.info, s.f.)

Para los volteos se utiliza una pala y se busca que los granos de la superficie queden en el interior y mediante esto conseguir una fermentación uniforme de la masa de granos, pues generalmente los granos en la superficie fermentan más rápidos que los del interior de la pila (González Orjuela, 2021).

**1.2.3 Fermentación en Cajón**

Los granos de cacao son colocados en una caja de madera con aberturas de entre 5 y 10 mm para lograr la entrada de aire a la masa de granos, esto durante un periodo de 5 días. Se pueden cubrir las cajas con hojas de plátano o costales de yute, para mantener conservado el calor y humedad. Las cajas pueden colocarse una sobre otra formando una escalera para la fermentación en la caja de manera escalonada, así por la fuerza de gravedad los granos pasan de una caja a otra permitiendo realizar con más facilidad el procedimiento de los volteos, en caso de solo ser el cajón sencillo los volteos se realizan con pala (Pérez et al., 2019).

En este método pueden afectar la profundidad de la masa de los granos que debe tener un espesor mínimo de 20 cm, además de la duración de la fermentación, ya que suele variar dependiendo el tipo de grano (Teneda Llerena, 2016).

### Figura 3

Fermentador de granos de cacao tipo cajón construidos de madera



**Nota.** Fotografía de granos de cacao sobre hojas, listos para envoltura. Tomada de *Federación Nacional de Cacaoteros – FEDECACAO* (s.f.).

### Figura 4

Fermentador de granos de cacao de cajón tipo escalera



**Nota.** La figura muestra cajones de madera instalados de forma vertical, para fermentar granos de cacao. Tomado de (Teneda Llerena, 2016).

### 1.2.4 Fermentación en Tambor Rotatorio

El tambor rotatorio consiste en un cilindro de madera con dos tapas (ver Figura 5); una hermética que permite la fermentación anaeróbica y otra tapa con rejillas que permite el paso de aire para la fermentación acética, también tiene una manivela con la cual se puede realizar la rotación. Permite fermentar hasta 250 kg de cacao, que es aproximadamente la producción de una hectárea de cacao. El tambor necesita de un lugar cubierto con ventilación, con un piso que tenga canales para recoger y drenar el exudado (Teneda Llerena, 2016).

#### Figura 5

Fermentador tipo tambor rotatorio



*Nota.* La figura muestra un fermentador tipo tambor rotatorio construido de madera. Tomado de (Teneda Llerena, 2016).

## **1.3 PARÁMETROS DE INTERÉS EN LA FERMENTACIÓN DEL CACAO**

### **1.3.1 Temperatura**

Durante los primeros días de fermentación la temperatura llega hasta los 45 - 50 °C, luego empieza a descender lentamente y vuelve a subir cuando se realiza la segunda remoción, llegando al final a subir hasta los 48 - 50 °C, para luego disminuir una vez que ha concluido el proceso de fermentación. El embrión en el interior del grano muere cuando, además de cambiar el pH por efecto de la presencia del ácido acético que se ha difundido a través de la testa, la temperatura interna del grano llega a 45 °C, marcándose el inicio de los cambios bioquímicos que conducirán a la formación de los precursores del sabor y aroma a chocolate (Erazo Gavilánez & Gallegos Eras, 2019).

### **1.3.2 pH**

El pH de los cotiledones durante el primer día de fermentación decrece lentamente (hasta 6.3), pero durante el tercer y cuarto día baja rápidamente hasta alcanzar un valor de 4.75 aproximadamente; este valor sufre muy pocos cambios hasta que se termina la fermentación, asimismo, menciona que por acción del ácido acético al tercer día el pH baja a 4,8 y se mantiene durante el resto de la fermentación debido a la permeabilidad de la testa, dato confirmado por quien menciona que después de la fermentación el rango final de pH es de 4.5 a 5.5. El pH de la testa en cambio, inicia muy bajo favoreciendo cierto tipo específico de microorganismos, su valor sube lentamente hasta llegar a 4.0; causado por la pérdida de ácido cítrico debido al drenaje de los jugos y por el metabolismo microbiano (López, citado por Erazo 2019), pero durante el tercer día este valor sube rápidamente hasta igualar al comienzo del cuarto día el valor del pH de 4.75 del cotiledón, durante el resto de la fermentación y hasta medio día de secado tiene un aumento hasta 5.2., llegando a un pH al final del secado de 6.8 (Erazo Gavilánez & Gallegos Eras, 2019).

### **1.3.3 Humedad relativa**

Durante el proceso de fermentación en tres regiones de Colombia (Antioquia, Santander y Huila), los investigadores utilizaron registradores de temperatura y humedad relativa ubicados a 0.30 m del techo dentro de las cámaras de fermentación, lo que permitió un monitoreo continuo del entorno. Las condiciones climáticas naturales de los sitios arrojaron un rango de humedad relativa ambiental entre 70–85 %. Se observó que una alta humedad relativa, junto con una ventilación limitada, favorecía el riesgo de desarrollo de hongos y sabores no deseados, mientras que una humedad moderadamente baja durante los volteos facilitaba la evaporación del exudado, lo cual implicó pérdida de humedad del grano y favoreció las reacciones enzimáticas esenciales para la formación de aromas (como la formación de precursores de sabor). Este hallazgo destaca la importancia de controlar la humedad relativa en la fermentación para equilibrar la actividad microbiana, prevenir defectos por mohos e impulsar adecuadamente los procesos bioquímicos deseados (Calvo et al., 2021).

### **1.4 ZONAS DE CULTIVO DE CACAO EN EL SALVADOR**

La agricultura es desarrollada principalmente en zonas rurales de difícil acceso y donde las telecomunicaciones muchas veces no nos ofrecen la mejor cobertura. En cuanto a la utilización de la tecnología LoRa para la transmisión de los datos, se determinó que ofrece rangos de cobertura considerable y consumos de energía bajos en cuanto a la implementación y montaje de equipos necesarios para el monitoreo de los parámetros de interés, que generalmente, bien podrían ser fincas de mucha extensión desde el punto donde se fermenta el cacao y el lugar donde se tenga disponibilidad de recursos y servicios, por ejemplo, se retoma un estudio denominado “Procesamiento artesanal del cacao” (Chávez-Santamaría et al., n.d.) el cual fue realizado en la Planta de Procesamiento agroindustrial (PPA) donde, gracias al departamento de recursos naturales de la facultad de Agronomía de la Universidad Nacional nos brindó un mapa identificando toda a extensión territorial de la Estación experimental ubicada en el cantón Tecualuya, municipio de San Luis Talpa, en el departamento de La Paz, a una altura de 50 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 32 ° C, ver Figura 6.



### Figura 7

Distribución de nodos para posibles puntos de instalación de monitoreo



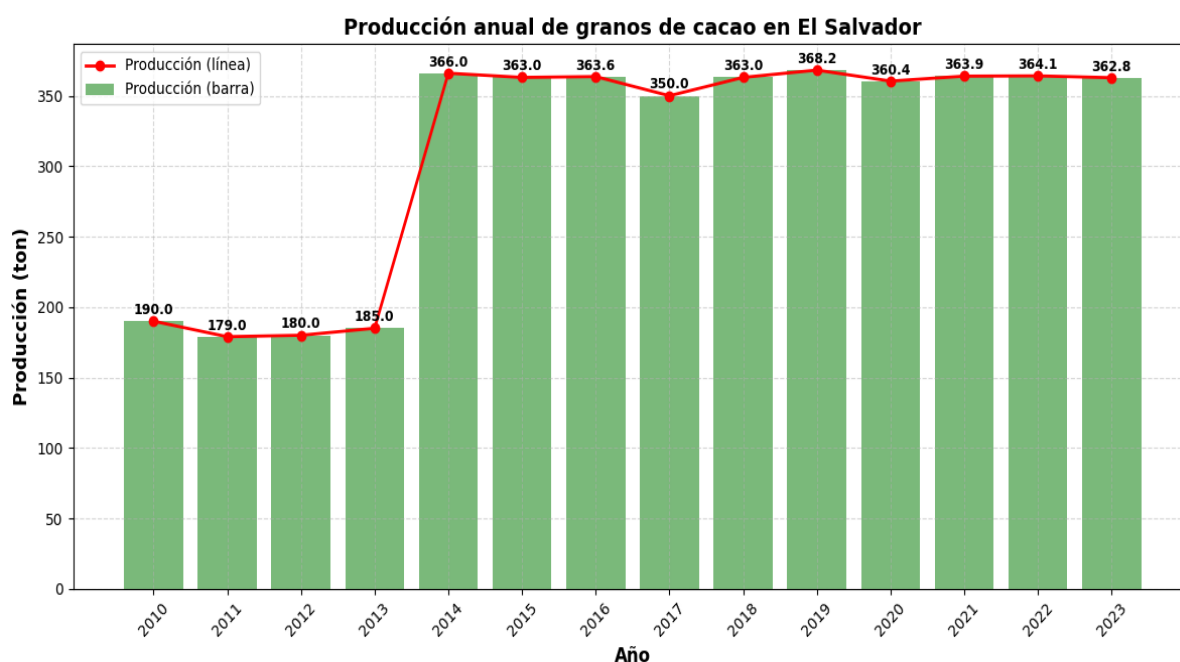
*Nota.* Elaboración propia. Posibles puntos de instalación de dispositivos LoRa en Estación Experimental de Prácticas de la Universidad de El Salvador (Aplicación de mapas del CNR).

A partir del año 2014 en El Salvador se tuvo un incremento de la producción del grano de cacao con un total de 366 toneladas en todo el territorio salvadoreño, según la base de datos estadísticos FAOSFAT, actualizado hasta el año 2023 se ha mantenido la producción anual de cacao tal como se observa en la Figura 8. Un parámetro importante a señalar es el número de productores por hectárea “El 60% de los productores registrados trabaja en áreas menores a 1 hectárea; el 35% de ellos trabaja en áreas entre 1 y 5 hectáreas; y solo el 5% cuenta con áreas mayores a 5 hectáreas.

En este sentido, destaca también que los 1,252 productores que trabajan con menos que 1 hectárea, en conjunto disponen de solo 562.6 hectáreas, el 18% del total de la superficie registrada para la producción de cacao; mientras que, los 102 productores con superficies mayores a 5 hectáreas disponen de un total de 1,213.7 hectáreas, lo que corresponde al 38% del área total” (IICA, s.f.).

### Figura 8

Producción anual de grano de cacao en toneladas en El Salvador

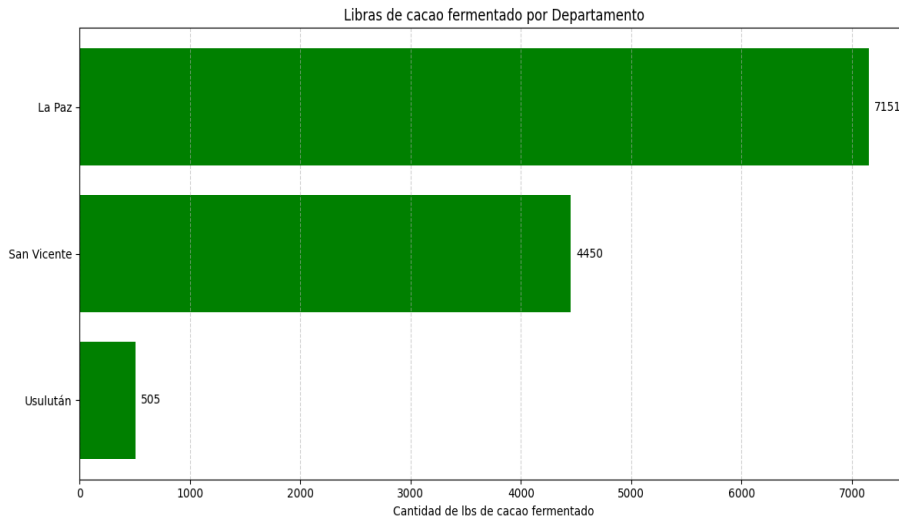


*Nota.* Elaboración propia. Producción anual de cacao en toneladas por año, se elabora gráfico con disposición de la base de datos (FAOSTAT 2025).

Se presenta una muestra de datos de la cantidad de libras de cacao fermentado en algunos departamentos y municipios de El Salvador, proporcionados por el Ing. Agr. Erick Guardado, donde se refleja la cantidad de libras de cacao fermentado que los productores realizan para la venta y autoconsumo en las fincas de cacao de manera tradicional.

### Figura 9

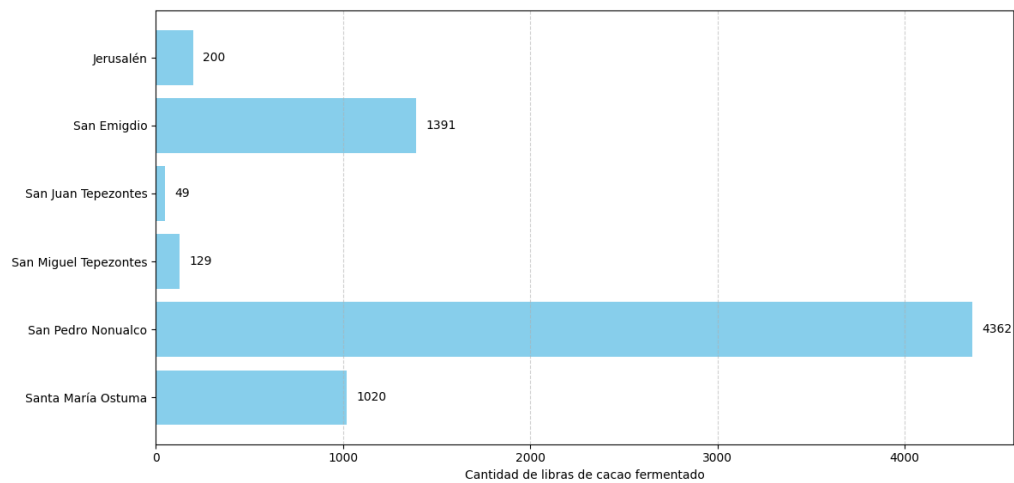
Libras de cacao fermentado por departamento



*Nota.* Elaboración propia. Gráfico elaborado con muestra de datos proporcionados por el Ing. Agr. Erick Guardado.

### Figura 10

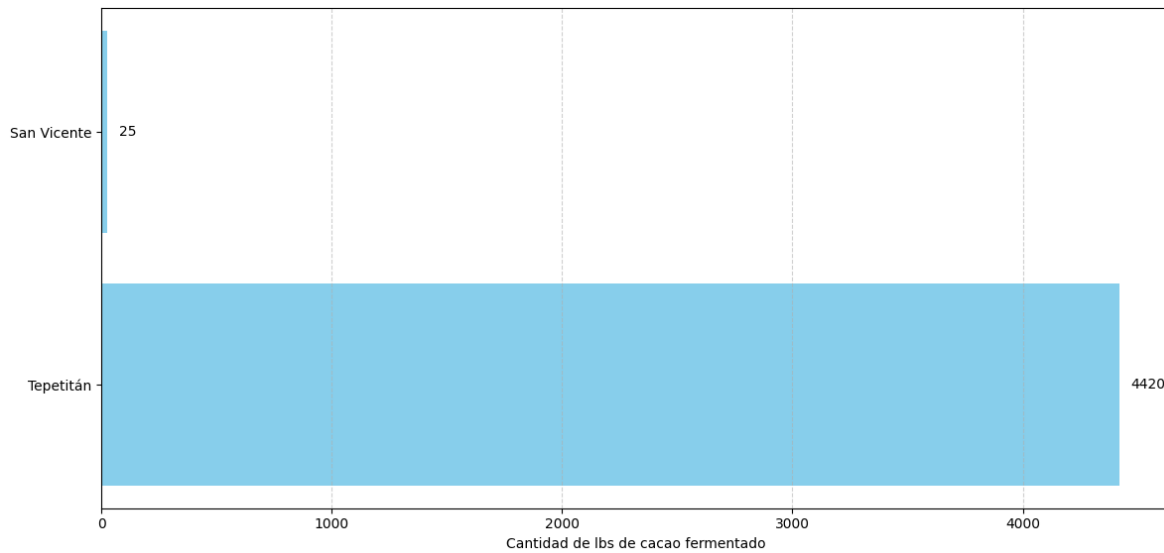
Libras de cacao fermentado por municipio Dpto. de La Paz



*Nota.* Elaboración propia. Gráfico elaborado con muestra de datos proporcionados por el Ing. Agr. Erick Guardado.

**Figura 11**

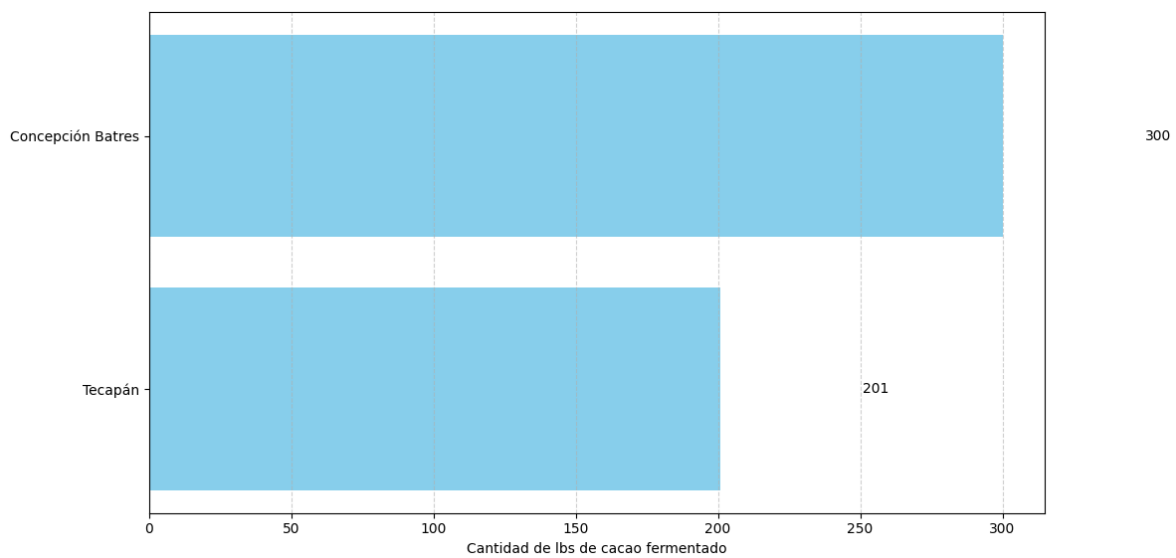
Libras de cacao fermentado por municipio Dpto. de San Vicente



*Nota.* Elaboración propia. Gráfico elaborado con muestra de datos proporcionados por el Ing. Agr. Erick Guardado.

**Figura 12**

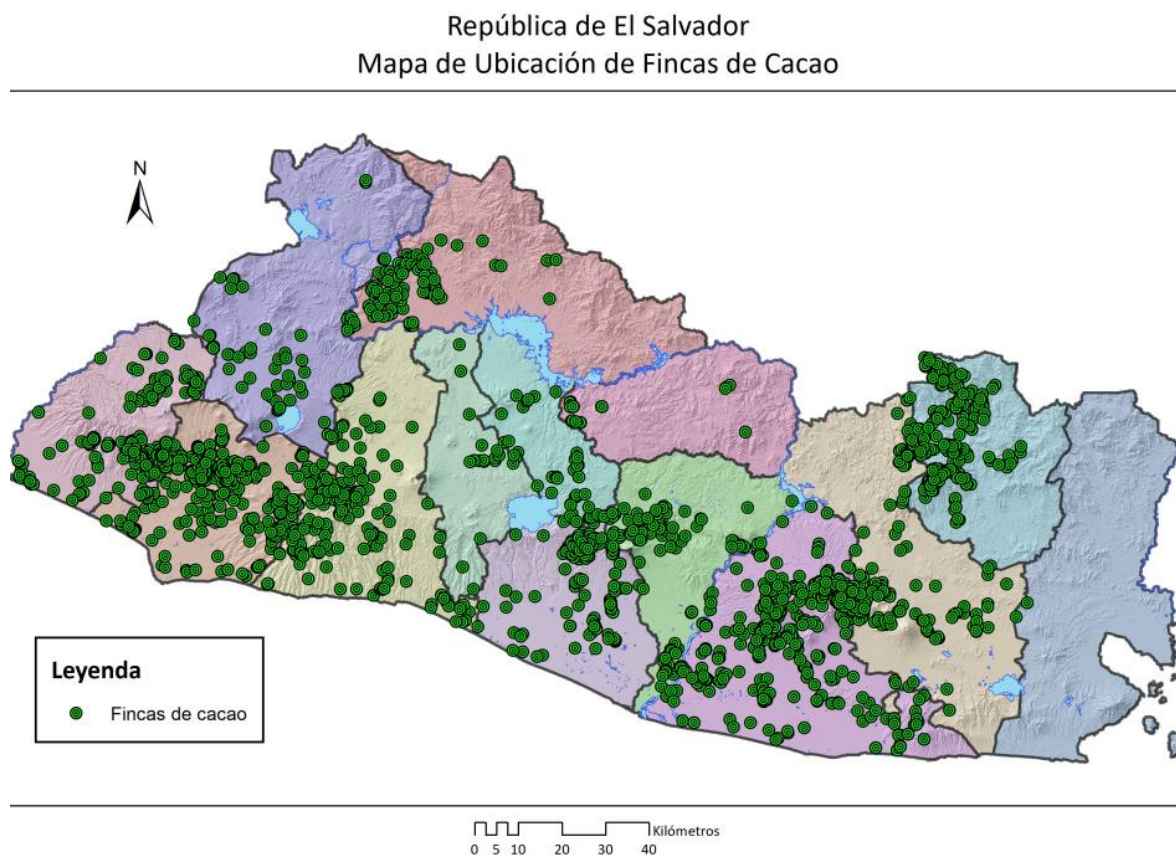
Libras de cacao fermentado por municipio Dpto. de Usulután



*Nota.* Elaboración propia. Gráfico elaborado con muestra de datos proporcionados por el Ing. Agr. Erick Guardado.

**Figura 13**

Mapa de ubicación de fincas de cacao salvadoreñas



*Nota.* Cortesía del CENTA (Julio 2025) Distribución de fincas a lo largo del territorio salvadoreño

## 1.4 Internet de las Cosas (IoT)

### 1.4.1. Concepto de IoT

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés: Internet of Things) es un paradigma tecnológico que permite la interconexión de objetos físicos a través de redes digitales, con el fin de recopilar, intercambiar y procesar datos de forma automática y en tiempo real. Estos “objetos” o “cosas” pueden incluir sensores, dispositivos electrónicos, máquinas, vehículos, e incluso productos cotidianos, dotados de capacidad de comunicación y procesamiento (Atzori et al., 2010).

El objetivo principal del IoT es facilitar la toma de decisiones inteligentes mediante el acceso a datos relevantes y precisos sobre entornos físicos, sin intervención humana directa. Gracias al IoT, es posible desarrollar aplicaciones en campos tan diversos como la salud (monitoreo remoto de pacientes), la agricultura (control de variables climáticas y del suelo), la industria (automatización de procesos) y las ciudades inteligentes (gestión de tráfico, iluminación o residuos) (Gubbi et al., 2013).

La arquitectura básica de un sistema IoT se compone generalmente de cuatro capas fundamentales:

- Capa de percepción o sensores, que capta información del entorno físico (como temperatura, humedad, movimiento, etc.).
- Capa de red, que transmite la información recolectada mediante tecnologías como WiFi, LoRa, Zigbee, NB-IoT, entre otras.
- Capa de procesamiento, que puede incluir microcontroladores, microprocesadores o plataformas en la nube encargadas de analizar y procesar los datos.
- Capa de aplicación o visualización, donde los usuarios interactúan con los datos a través de interfaces gráficas, aplicaciones móviles o dashboards web (Al-Fuqaha et al., 2015).

Esta arquitectura distribuida y escalable permite la integración de múltiples dispositivos heterogéneos, lo que hace del IoT una tecnología flexible, eficiente y de alto impacto para el monitoreo y control de procesos, especialmente en contextos agrícolas y rurales donde la conectividad tradicional puede ser limitada.

#### **1.4.2. Aplicaciones de IoT en agricultura (Agricultura 4.0)**

En la actualidad, los avances tecnológicos, especialmente lo que se conoce como Internet de las Cosas o IoT, tienen el potencial de ayudar a resolver problemas que se presentan en la fermentación del cacao. Estas tecnologías tienen la capacidad de auto gestionarse y reaccionar a cambios en su entorno (Naveen & Hedge, 2010), generan información útil mediante sensores sin intervención humana (Gubbi et al., 2013).

Por ejemplo, un sensor que controle la temperatura de la fermentación puede proporcionar información continua y precisa, difícil de lograr con métodos manuales. Las IoT garantizan un control detallado y constante de la temperatura, lo que contribuye a un mejor control del proceso de fermentación. Estas tecnologías incluyen diversos dispositivos que facilitan su interconexión hacia la internet, lo que los vuelve propicios para la recopilación, transmisión y aplicación de técnicas de análisis de datos. Su uso en diversas industrias ha permitido la automatización de procesos y la optimización de recursos (Ray, 2017). En este contexto, el IoT permite implementar soluciones tecnológicas que integran sensores distribuidos en el campo para recopilar datos sobre variables ambientales como temperatura, humedad del suelo, nivel de radiación solar, pH o condiciones meteorológicas. Estos datos se transmiten a plataformas de análisis donde pueden ser procesados para tomar decisiones informadas, como ajustar los ciclos de riego, prevenir enfermedades en cultivos o planificar cosechas (Chen et al., 2018). Entre las aplicaciones más destacadas del IoT en la agricultura se incluyen:

- Sistemas de riego inteligente, que se activan según los niveles de humedad detectados en el suelo.
- Monitoreo de invernaderos, donde se controlan variables como la temperatura, ventilación e iluminación.
- Ganadería inteligente, con collares o sensores que registran el comportamiento y salud del ganado.
- Trazabilidad de productos agrícolas, desde su cosecha hasta su distribución en mercados.
- Monitoreo de procesos post-cosecha, como el secado, fermentación o almacenamiento de productos como el café y el cacao (Verdouw et al., 2016).

La aplicación del IoT en estos ámbitos no solo mejora el rendimiento agrícola, sino que también contribuye a la reducción de desperdicios, el uso racional del agua y fertilizantes, y una mayor calidad del producto final, aspectos especialmente relevantes en cultivos de alto valor como el cacao.

## 1.5 Dispositivos y Tecnologías Utilizadas

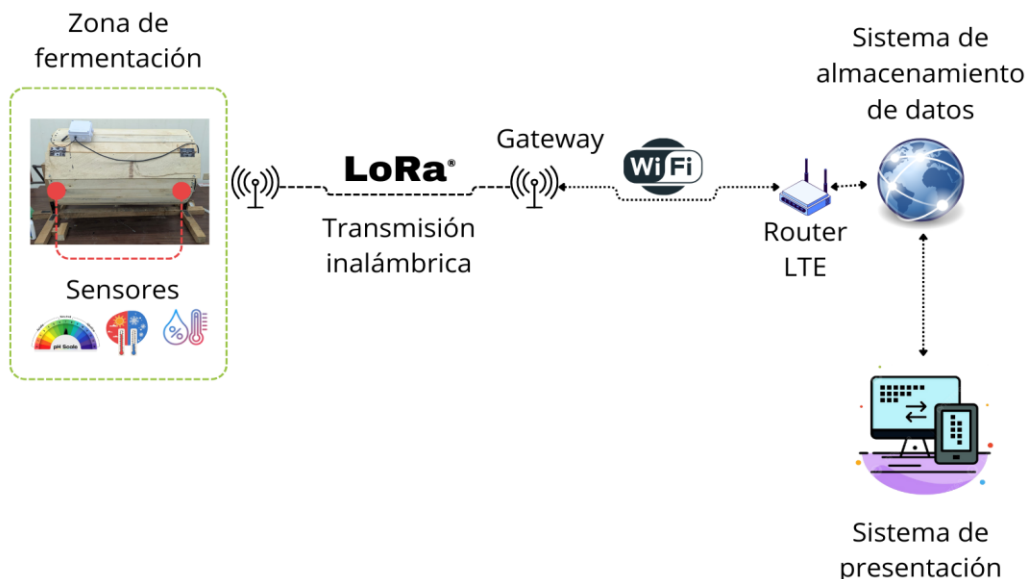
El presente proyecto de monitoreo en el proceso de fermentación de cacao implementó una arquitectura IoT basada en microcontroladores de bajo costo, sensores ambientales y tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance (LoRa). Esta configuración permitió la recolección y transmisión de datos en tiempo real desde la zona de fermentación hacia un punto de recepción sin necesidad de infraestructura WiFi o acceso a internet, facilitando su uso en contextos rurales.

El sistema IoT que se propone para esta aplicación, se describe en la Figura 14, en donde sus componentes principales son:

- a) Cámara de fermentación
- b) Procesador ESP32
- c) Sensores
- d) Gateway
- e) Sistema de almacenamiento de datos en la nube
- f) Interfaz de presentación

**Figura 14**

Diagrama en bloques del sistema IoT propuesto



*Nota.* Elaboración propia en (Canva, n.d.) con imágenes adaptadas de (iStockphoto LP, n.d.), (Freepik, n.d.) y (Pngtree, n.d.).

La cámara de fermentación (tómbola) no posee capacidades de conectividad por sí misma, pero forma parte del sistema IoT al ser el entorno físico donde se instalan sensores encargados de recopilar datos relevantes del proceso. En este contexto, se considera el ‘objeto’ monitorizado dentro del paradigma del Internet de las Cosas, permitiendo una digitalización parcial del proceso artesanal de fermentación del cacao. Cuenta con un volumen de llenado de 0.198 metros cúbicos, lo que permite un almacenamiento de aproximadamente 150 libras de cacao. Además, puede girar sobre su eje, lo que se controla de forma manual. Está construido con tablas de madera las cuales cuentan con hendiduras para facilitar la salida de los residuos producto de la fermentación, pero sin dejar salir el grano de cacao.

### 1.5.1. Microcontroladores ESP

Se utilizó el **ESP32**, un microcontrolador de bajo costo con arquitectura de doble núcleo, conectividad WiFi y Bluetooth integrada, ampliamente empleado en soluciones IoT por su alto rendimiento y bajo consumo energético. Desarrollado por Espressif Systems, el ESP32 permite ejecutar múltiples tareas en paralelo y ofrece una mayor cantidad de pines y periféricos que su predecesor, el ESP8266 (Espressif Systems, 2025).

En el presente proyecto se implementaron **dos dispositivos ESP32**:

- Uno actuó como **nodo sensor**, recolectando datos ambientales mediante sensores conectados a sus pines digitales y analógicos.
- El segundo funcionó como **nodo receptor**, recibiendo los datos enviados a través de los módulos LoRa y sirviendo como punto de visualización o registro.

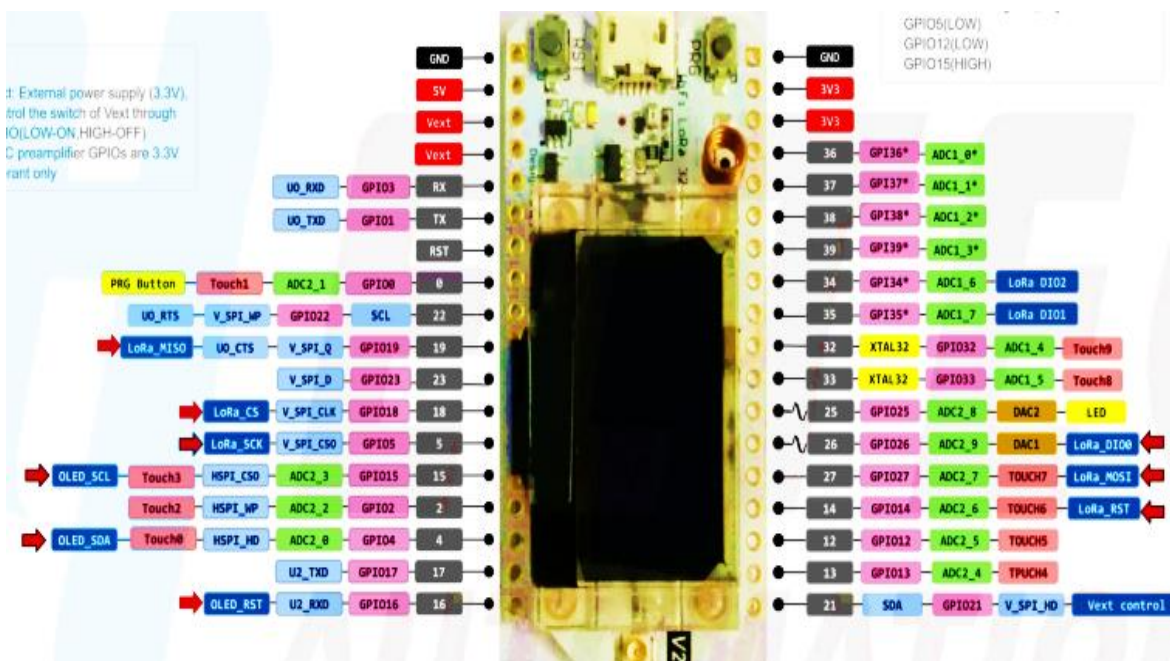
Gracias a su versatilidad, el ESP32 permitió integrar múltiples sensores y gestionar la comunicación con el módulo LoRa sin necesidad de componentes adicionales. Su facilidad de programación a través del entorno Arduino IDE o MicroPython, y su amplia comunidad de soporte, lo convierten en una opción ideal para proyectos de monitoreo ambiental y agrícola.

Constituye el elemento principal del sistema, encargado de gestionar la captura, procesamiento y transmisión de datos. La Figura 15, muestra una imagen de este componente.

- Procesador ESP32 WiFi LoRa V2 (Gateway)

**Figura 15**

Imagen del dispositivo ESP32



*Nota.* La figura muestra el diagrama de pines del procesador ESP32 usado como Gateway. Tomado de (Heltec Automation, 2023a)

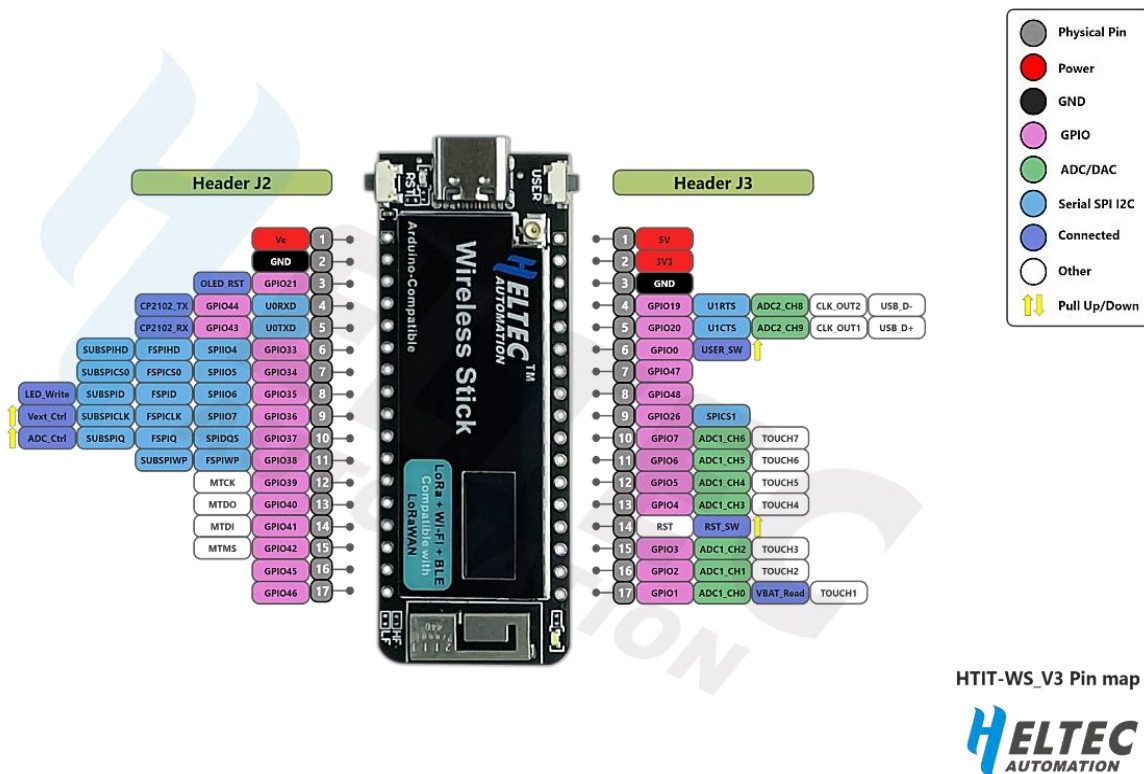
**Tabla 1**

*Descripción de las placas ESP32 utilizadas*

Características	Heltec WiFi LoRa 32 V2	Heltec Wireless Stick V3
Microcontrolador	ESP32 (2 núcleos, Wi-Fi, Bluetooth integrado)	ESP32 (2 núcleos, Wi-Fi, Bluetooth integrado)
Chip LoRa	SX1276	SX1262
Factor de forma	Largo, compatibilidad con protoboard	Compacto
Pantalla OLED	128x64 pixeles	64x32 pixeles
Antena	Integrada (reemplazable)	Integrada (no reemplazable)
Batería (conexión)	Puerto BMS integrado	Puerto BMS integrado
Configuración	Puerto micro-USB	Puerto USB-C
Enfoque	Prototipos, desarrollo	Proyectos compactos

*Nota.* Información tomada de (Heltec Automation, 2023a) y (Heltec Automation, 2023b)

**Figura 16**  
Imagen del dispositivo ESP32 usado como nodo IOT



*Nota.* Tomado de (Heltec Automation, 2023b).

## 1.5.2. Comunicación Inalámbrica con LoRa

### 1.5.2.1. ¿Qué es LoRa?

LoRa (*Long Range*) es una tecnología de modulación de espectro ensanchado desarrollada por Semtech, diseñada para permitir comunicaciones de largo alcance con muy bajo consumo de energía. Es ideal para entornos donde se requiere enviar pequeñas cantidades de datos a través de largas distancias, lo que la hace muy adecuada para aplicaciones agrícolas e industriales (Centenaro et al., 2016).

### 1.5.2.2. Aplicación de LoRa en IoT

Las redes IoT, hacen uso de tecnologías de comunicación inalámbricas de largo alcance conocidas como LoRa® (o Long Range) y baja potencia, en una banda de frecuencias reservada para su uso libre (es decir, que no requiere concesión o licencia de uso).

Por sus características de propagación, son ideales para la transmisión de datos a largas distancias. Emplea técnicas de espectro ensanchado (o Spread Spectrum) y además hace uso de protocolos asociados a redes LoRaWAN® (Long Range Wide Area Network) (LoRa Alliance®, 2025). Su bajo consumo energético, capacidad de operar en bandas de frecuencia de uso libre, así como su alcance, hacen que esta sea una opción eficiente para implementar redes de comunicación en entornos remotos (Bertoleti, 2019).

Las frecuencias de operación de LoRa®, varían de acuerdo con la zona geográfica en la cual se usen. En lo que respecta a El Salvador, estas frecuencias se agrupan en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 902MHz a 928MHz (SIGET, 2004). Estas frecuencias facilitan la comunicación en entornos adversos (principalmente obstáculos) con baja interferencia; además, por el tipo de modulación utilizado, estos sistemas permiten la recuperación de señales de muy bajo nivel.

Tomando en cuenta las particularidades de El Salvador, los factores más importantes que afectan el alcance de estos sistemas inalámbricos (Hernando Rábanos et al., 2015), se asocian a los siguientes factores:

- Longitud de trayectos (pérdidas de propagación)
- Frecuencia de operación
- Obstáculos (vegetación, montañas, edificios).
- Fenómenos meteorológicos (atenuación por lluvia, despolarización, desvanecimientos, etc.).
- Interferencias electromagnéticas (generadas por dispositivos operando en la misma banda de frecuencias).

La tecnología LoRa ofrece diversas formas de ajustar sus características de transmisión de señal, para reducir el impacto de los factores antes mencionados, entre lo cual destaca el “*Factor de Propagación*”, el factor de “*Tasa de transferencia de datos*” y la “*Sensibilidad*” (o el nivel de señal más pequeña que puede procesar). Diversas combinaciones de estos parámetros se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
*Factores de propagación en envíos de datos*

Factor de propagación	Tasa de transferencia de datos	Velocidad de bits [bits/s]	Rango [km]	Sensibilidad Rx [dBm]	Carga máxima de paquetes [Bytes]
12	0	290	12	-136	51
11	1	440	10	-133	51
10	2	980	8	-132	51
9	3	1760	6	-129	115
8	4	3125	4	-126	222
7	5	5470	2	-123	222

*Nota. Obtenido de (Arias Argueta & Orozco Mejía, 2024)*

### 1.5.2.3. Predicción de cobertura teórica

Para calcular el alcance teórico de la antena, teniendo en cuenta los parámetros utilizados en el código, se utilizarán distintas fórmulas. En el código fuente se estableció una potencia de 20, la cual, según el manual del microprocesador, equivale a 20dBm.

Se puede utilizar la fórmula de pérdida del espacio libre derivada de la ecuación de Friis (Alves Rodrigues et al., 2025).

$$Lfs(dB) = 32.45 + Gt + Gr + 20Log_{10}(d) + 20Log_{10}(f) \quad (1)$$

Donde:

- $d$  es la distancia en kilómetros,
- $f$  es la frecuencia en MHz.

Conociendo la ganancia y sensibilidad de las antenas, y la frecuencia, se puede obtener la distancia teórica en condiciones ideales, sin obstáculos, interferencia o pérdidas adicionales:

$$P_{tx} = 20, \quad Gt = Gr = 2dBm, \quad Sensibilidad_{rx} = -137dBm, \\ f_{MHz} = 915$$

$$d = 10^{\left(\frac{P_{tx} + G_t + G_r - \text{Sensibilidad}_{rx} - 32.45 - 20\text{Log}_{10}(f_{\text{MHz}})}{20}\right)}$$

$$d = 2921\text{m} = 2.9\text{km}$$

Despejando de la ecuación (1) para la distancia y sustituyendo los valores definidos, se tiene un resultado de 2.9 km para el desarrollo del enlace LoRa.

#### 1.5.2.4. Pruebas prácticas de cobertura

Durante las pruebas prácticas de cobertura, se utilizó un analizador de espectro Tektronix RSA306B, conectado a una antena omnidireccional de 2 dBi de ganancia, con el objetivo de verificar la intensidad y la forma de la señal LoRa transmitida a 915 MHz.

**Figura 17**

Prueba de recepción de datos mediante analizador de espectro



*Nota.* Elaboración propia. Señal obtenida de un mensaje enviado mediante LoRa detectada por un analizador de señales RSA306B

La medición se realizó en condiciones de línea de vista, a una distancia aproximada de 100 metros entre el nodo transmisor y el punto de recepción. En la captura realizada, se observó una señal con una potencia de -63.14 dBm, registrada dentro de un ancho de banda de 10 MHz.

Este valor indica una recepción robusta y sin pérdidas significativas, lo cual es consistente con la confiabilidad de LoRa en aplicaciones de largo alcance y bajo consumo energético. La imagen obtenida muestra el pico de energía centrado en la frecuencia de operación, evidenciando la correcta transmisión y el uso eficiente del espectro ISM sin interferencias cercanas relevantes. Estos resultados validan la adecuación de LoRa para aplicaciones agrícolas en espacios abiertos, incluso con antenas de ganancia moderada y sin necesidad de infraestructura intermedia.

### **1.5.3. Sensores utilizados**

- Sensor de temperatura y humedad: SHT30

Este sensor digital de alta precisión permite medir temperatura y humedad relativa (ver Figura 18), en un amplio rango, con una precisión de  $\pm 0.2$  °C y  $\pm 2$  % HR, respectivamente. Utiliza el protocolo I2C, lo que facilita su conexión al ESP32 mediante solo dos líneas (SDA y SCL), permitiendo también la expansión futura del sistema con otros sensores en la misma interfaz (Sensirion AG, n.d.). Este protocolo permite la conexión de múltiples dispositivos maestros y esclavos en el mismo bus. El ESP32 cuenta con dos interfaces I2C que pueden configurarse como maestro o esclavo, y soporta velocidades de hasta 400 kHz en modo rápido (ESPRESSIF, 2025).

**Figura 18**

## Sensor de Temperatura y Humedad FS400-SHT30



*Nota:* Imagen recuperada de (Amazon, n.d.)

- Sensor de pH: PH4502C

Este sensor permite medir el nivel de acidez del medio (ver Figura 19), parámetro relevante para evaluar la actividad microbiana durante la fermentación. El PH4502C se conectó al convertidor ADC del ESP32 mediante un pin analógico, proporcionando valores de voltaje que fueron luego escalados y calibrados para reflejar valores de pH dentro del rango de 0 a 14 (DFRobot, n.d.). Estos ADCs permiten convertir voltajes en el rango de 0 a 3.3 V en valores digitales de 0 a 4095. Además, es posible ajustar la resolución y la atenuación para adaptar el rango de entrada según las necesidades específicas de la aplicación (ElectronicWings, 2024).

Figura 19

Sensor PH4502C, diagrama de pines del sensor PH4502C



*Nota:* Imagen recuperada de (UNIT Electronics, n.d.)

La amplia gama de sensores disponibles para aplicaciones IoT, ofrecen alternativas de bajo costo que se adaptan a las necesidades de pequeños y medianos productores, y a la vez reduciendo la complejidad de este tipo de sistemas. Las características técnicas de ambos sensores, obtenidos cada uno de ellos de sus hojas técnicas, se resumen en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Características de los sensores de temperatura (SHT30), y pH (PH4502C)*

Sensor	Modelo	Características
pH	4502C	Rango de medición: 0 a 14 Precisión: $\pm 0.1$ (a 25°C) Voltaje de operación: 5V $\pm 0.2$ V Corriente de operación: $\sim 5$ -10mA
Temperatura	SHT30	Rango de medición: -40°C a 125°C Precisión: $\pm 0.2$ °C Voltaje de operación: 2.4V - 5.5V Corriente de operación: $\sim 1.5$ mA
Humedad	SHT30	Rango de medición: 0% a 100% HR Precisión: $\pm 2$ HR Voltaje de operación: 2.4V - 5.5V Corriente de operación: $\sim 1.5$ mA

*Nota:* Tomado de (DFRobot, n.d.) y (Sensirion AG, n.d.).

Ambos sensores fueron alimentados directamente desde el ESP32 y sus lecturas se enviaron a través del módulo LoRa al nodo receptor para su análisis.

#### 1.5.4. Plataforma de recolección o visualización de datos

- Sistema de almacenamiento de datos en la nube

Para el almacenamiento de todos los datos recopilados se ha utilizado un servicio en la nube llamado Thingsboard®; este es una plataforma IoT de código abierto que simplifica la visualización, integración y administración de los dispositivos conectados a ella y los datos que recibe de ellos (Thingsboard, 2025c). Soporta una gran variedad de dispositivos simultáneamente, lo que permite realizar sistemas IoT escalables en caso de que se desee agregar más sensores en dispositivos adicionales.

Para lograr una conexión con la plataforma, esta nos brinda una dirección IP la cual almacena toda la telemetría registrada por los sensores, 195.179.231.58:8080 nos brinda acceso a los datos y al panel de control. Para asegurar una conexión segura, Thingsboard® incorpora diversas funciones de seguridad que permiten proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos por los dispositivos IoT.

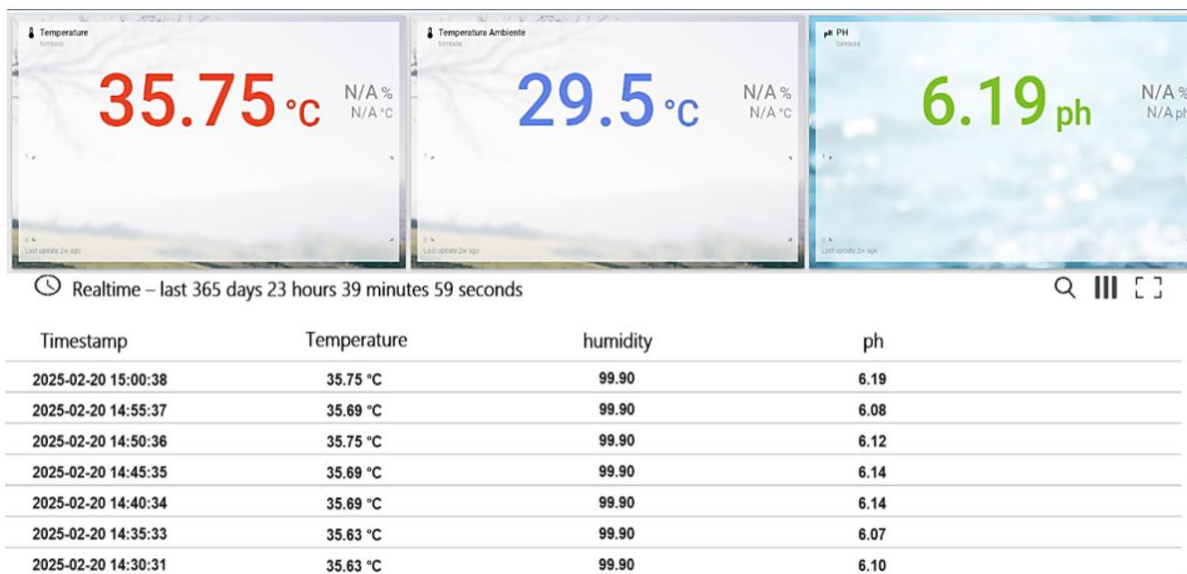
Entre sus principales características se encuentran el soporte para autenticación de dispositivos mediante tokens de acceso, control de acceso basado en roles (RBAC) y compatibilidad con conexiones seguras a través de TLS/SSL. Estas funcionalidades permiten gestionar con mayor precisión los permisos de usuarios y dispositivos, reduciendo el riesgo de accesos no autorizados y mejorando la trazabilidad del sistema (Thingsboard, 2025b). Esta elección se basó en su **bajo costo** (a partir de \$10 USD mensuales en su plan más básico), la **facilidad de integración con dispositivos embebidos**, y la ventaja de ser una **plataforma administrada en la nube**, lo cual eliminó la necesidad de configurar infraestructura adicional o servidores locales.

- Interfaz de presentación

Se ha diseñado un panel tomando en cuenta las siguientes variables: Hora de la medición, Temperatura, Humedad y pH; para efectos de prueba y verificación de la comunicación entre todos los componentes se ha establecido un intervalo de medición de 10 segundos, para efectos de monitorización y medición en campo, teniendo ya el cacao en la tómbola es de 5 minutos. Cada medición realizada se muestra simultáneamente en el panel creado en Thingsboard® con lo cual se tiene la visualización de todas las variables en tiempo real. La Figura 20 muestra el aspecto del panel de visualización.

**Figura 20**

Captura de pantalla del panel de visualización de variables de Thingsboard®



*Nota.* En la figura se observa panel de las mediciones realizadas en tiempo real en (Thingsboard®, 2025). *Elaboración propia*

### 1.5.5. Protocolo de comunicación MQTT

Para la comunicación entre el ESP y la plataforma de almacenamiento y visualización, se utilizó el protocolo MQTT. El protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es ampliamente utilizado en aplicaciones IoT por su eficiencia en redes con ancho de banda limitado y dispositivos con recursos restringidos. El protocolo se utilizó para enviar datos hacia la plataforma Thingsboard®, aprovechando su modelo de publicación/suscripción para transmitir telemetría de manera confiable y en tiempo real. MQTT permite una comunicación ligera entre el microcontrolador y el servidor, optimizando el uso de energía y mejorando la escalabilidad del sistema (Thingsboard, 2025a).

### 1.5.6. Router LTE y conectividad celular

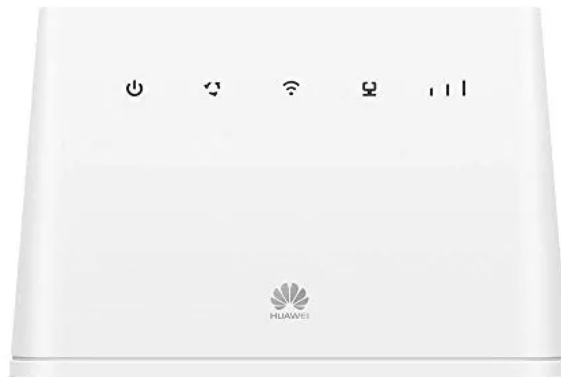
Dado que el lugar donde se realizó la fermentación no contaba con acceso a WiFi ni internet por cable, se utilizó un **router LTE con soporte para redes 3G/4G**, equipado con una tarjeta SIM de datos móviles activa (ver Figura 21).

Este router generó una red local inalámbrica (WiFi) que permitió al **ESP32 gateway** conectarse a internet y comunicarse con el broker MQTT. El uso de un router LTE facilitó la instalación del sistema en zonas rurales, sin depender de la infraestructura de telecomunicaciones tradicional.

El Huawei B311-221 es un router 4G LTE de categoría 4 diseñado para ofrecer conectividad inalámbrica eficiente en entornos domésticos o de pequeñas oficinas. Permite velocidades de descarga de hasta 150 Mbps y de subida de hasta 50 Mbps, utilizando redes móviles 4G. Además, facilita una conexión WiFi local, en la banda de 2.4 GHz (802.11n), alcanzando una velocidad máxima de transferencia de datos de 300 Mbps. Además, cuenta con una antena interna y un conector SMA para antenas externas, lo que mejora la cobertura y estabilidad de la señal. Su diseño compacto y funcionalidad plug-and-play lo hacen ideal para zonas donde la conexión por cable no es viable (*Manual Del Router Huawei B311-221*, 2022).

### Figura 21

Router Huawei B311-221



*Nota.* Recuperado de (*Manual Del Router Huawei B311-221*, 2022)

Las características técnicas del router Huawei se obtuvieron del manual de usuario, y se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4***Características del router Huawei B311-221*

Característica	Parámetro
Red móvil	4G LTE (Cat 4), 3G
Velocidad máxima de descarga	Hasta 150 Mbps
Velocidad máxima de subida	Hasta 50 Mbps
Wi-Fi	Banda única (2.4 GHz), Wi-Fi 4 (802.11n)
Velocidad Wi-Fi máxima	300 Mbps
Antena	1 antena interna y conector SMA para antena externa
Conector de antena externa	Tipo SMA
Puerto LAN/WAN	1 puerto RJ-45 (10/100/1000 Mbps)
Ranura para tarjeta SIM	Sí
Protocolos de red compatibles	DHCP, ICMP, IPv6, L2TP, NAT, PPTP
Seguridad inalámbrica	WPA2-PSK, botón WPS
Indicadores LED	LAN, Power, Status, WLAN
Interruptor de encendido/apagado	Sí

Nota: Información obtenida de (*Manual Del Router Huawei B311-221*, 2022).

### 1.5.7. Sistema de alimentación eléctrica

El sistema completo fue alimentado con **baterías recargables**, lo cual otorgó portabilidad y autonomía al proyecto. El nodo sensor funcionó con una batería **Li-Ion de 3.7 V** entregaba los 3.3 V requeridos por el ESP32 y los sensores, a su vez conectada a un elevador de voltaje que brindaba los 5V necesarios para la operación correcta del sensor de pH.

Acá se utiliza una batería tipo RXIN, la cual es una celda 18650 es una batería recargable de ion de litio. Su nombre proviene de sus dimensiones: 18 mm de diámetro y 65 mm de largo. Estas celdas ofrecen una alta densidad energética, una vida útil prolongada (entre 500 y 1000 ciclos de carga) y un voltaje nominal de 3.7 V, con una capacidad típica que varía entre 2200 mAh y 3500 mAh, dependiendo del fabricante y modelo (DLN Energy, n.d.).

## Figura 22

Batería RXIN con celda 18650



*Nota.* Imagen tomada de *GetLocal.ie* (s.f.).

Las características técnicas resumidas en la Tabla 5 son específicas para el tipo de celda que esta batería utiliza.

**Tabla 5**

*Especificaciones de batería con celda 18650*

Parámetro	Valor típico
Modelo	18650
Tipo de batería	Li-ion
Voltaje nominal	3.7 V
Voltaje de carga máxima	4.2 V
Capacidad nominal	2200 – 3500 mAh
Energía (Wh)	8.14 – 12.95 Wh
Corriente de descarga	2 – 10 A (dependiendo del modelo)
Ciclos de vida	500 – 1000

*Nota:* Información obtenida de (DLN Energy, n.d.)

### **1.5.8. Alternativas de comunicación inalámbricas consideradas**

Durante la fase de diseño del sistema IoT para el monitoreo de la fermentación del cacao, se evaluaron diversas tecnologías de comunicación inalámbrica. La elección final de una arquitectura basada en LoRa para la comunicación entre nodos y WiFi/LTE para la conexión del gateway a internet se fundamentó en un análisis de viabilidad técnica, consumo energético, cobertura y disponibilidad local. A continuación, se describen brevemente otras tecnologías consideradas y las razones por las cuales fueron descartadas:

#### **a) Zigbee**

Zigbee es una tecnología de bajo consumo que permite la creación de redes en malla. Sin embargo, su alcance en exteriores es limitado (menos de 100 metros) y su rendimiento disminuye considerablemente en entornos con obstáculos o interferencias, como los presentes en áreas agrícolas o rurales. Además, su configuración y escalabilidad requieren una infraestructura más compleja que LoRa (Vermesan & Friess, n.d.).

#### **b) Bluetooth Low Energy (BLE)**

BLE destaca por su eficiencia energética y su amplia disponibilidad en microcontroladores modernos. No obstante, fue descartado debido a su corto alcance (menor a 50 metros) y su enfoque en redes personales de corto alcance, lo cual no se ajusta a las necesidades de monitoreo remoto en campo abierto (Rayes & Salam, 2019).

#### **c) NB-IoT y LTE Cat-M1**

Ambas son tecnologías celulares de baja potencia diseñadas específicamente para aplicaciones IoT. Ofrecen buena penetración y cobertura extendida con bajo consumo energético. Sin embargo, en la región donde se desarrolló este proyecto, las operadoras locales aún no ofrecen soporte para estas tecnologías, lo que impide su aplicación práctica (Sinha et al., 2017).

#### **d) WiFi Mesh**

Las redes WiFi en malla permiten extender la cobertura a través de múltiples nodos. No obstante, presentan un consumo energético elevado, son sensibles a interferencias y requieren mayor infraestructura y configuración que LoRa. Esto las hace poco adecuadas para aplicaciones portátiles o alimentadas por baterías (Ntlatlapa, 2007).

#### **e) Ethernet cableado**

El uso de cables Ethernet fue descartado desde el inicio debido a la movilidad del sistema y la falta de infraestructura en zonas rurales. Además, el sistema está diseñado para operar en entornos sin acceso permanente a energía o red fija, lo que hace impráctica cualquier solución cableada.

#### **Elección final: LoRa + WiFi/LTE**

Considerando las características del entorno y los requerimientos del proyecto, se optó por una arquitectura híbrida compuesta por:

- LoRa, para la transmisión de datos entre el nodo sensor y el gateway, debido a su largo alcance, bajo consumo energético y simplicidad de implementación.
- WiFi, como enlace local para la conexión del ESP32 gateway al router LTE.
- LTE móvil, como medio para enviar los datos a un servidor MQTT en la nube, superando la limitación de no contar con infraestructura fija en el sitio de pruebas.

Esta combinación resultó efectiva para garantizar la continuidad de la comunicación sin necesidad de intervención manual, manteniendo bajo el consumo energético del nodo sensor y utilizando la red móvil solo desde el gateway.

## **CAPÍTULO 2: IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA**

### **2.1. Ensamblaje del sistema**

El sistema se construyó a partir de dos microcontroladores ESP32, sensores de temperatura, humedad y pH, módulos de comunicación LoRa, baterías portátiles y un router LTE. Para el montaje de los componentes electrónicos en el tambor, se utilizó un gabinete hermético que cumple la norma IP65, lo cual lo vuelve apropiado para su uso en exterior; la Figura 23 muestra el montaje realizado.

Además, se elaboró una placa PCB sobre la cual se montó el procesador ESP32 y los sensores, diseñada para ser lo más compacta posible. El sensor de temperatura y humedad se conectó utilizando los pines GPIO 47 y 48, los cuales fueron programados para utilizar el protocolo I2C. El sensor de pH se conectó al pin GPIO 1, el cual se programó para que utilice la función ADC; debido a que los pines de entrada del ESP32 solo admiten hasta 3.6V y el sensor trabaja en un rango de 0V a 5V, se utilizó un divisor de voltaje para manejar un rango de 0V a 2.5V de salida del sensor.

#### **El nodo sensor incluía:**

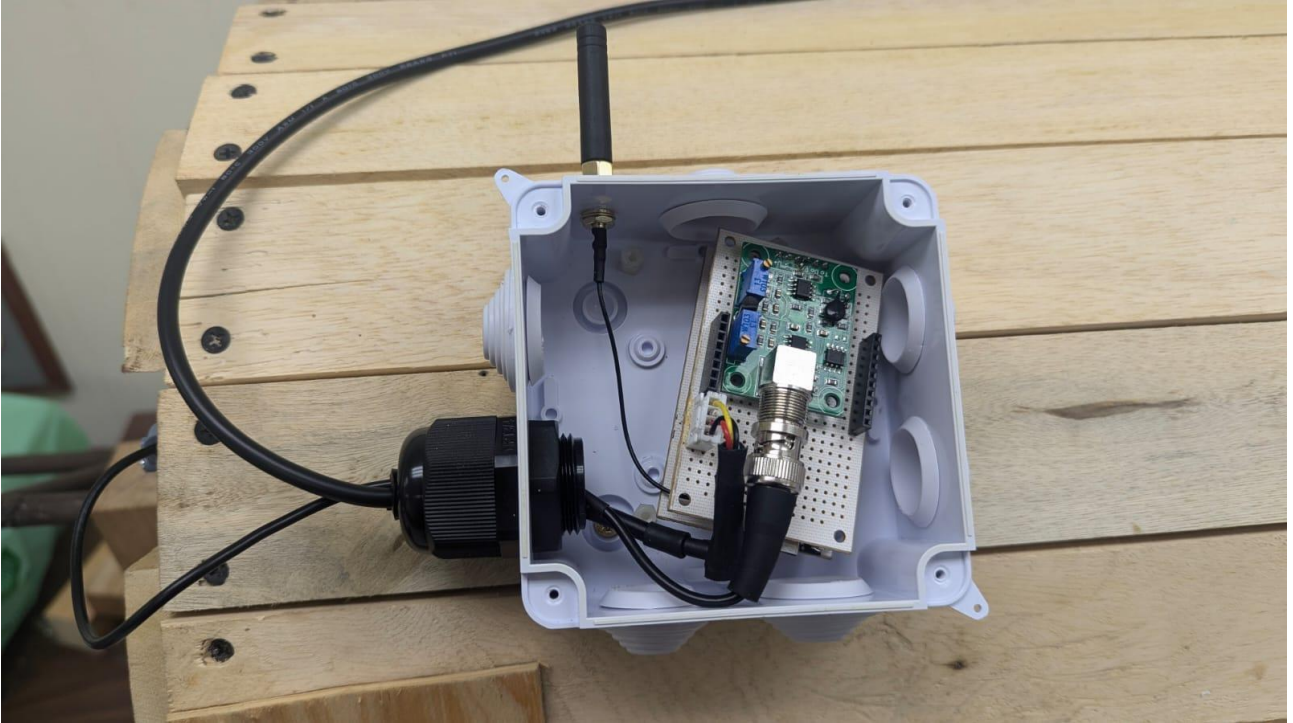
- Un ESP32 con chip LoRa integrado con su antena.
- Conexión del sensor SHT30 (temperatura y humedad).
- Conexión del sensor de pH PH4502C.
- Caja plástica protectora.
- Alimentación mediante una batería externa.

#### **El gateway consistía en:**

- Otro ESP32 con módulo LoRa integrado con su antena.
- Conexión WiFi al router LTE.
- Alimentación mediante una batería externa.
- Caja plástica protectora.
- Configuración para enviar los datos al servidor MQTT una vez recibidos.

Todo el sistema fue montado sobre una superficie estable y protegido de la humedad para evitar fallos durante las pruebas.

**Figura 23** Gabinete para el nodo IOT



*Nota.* En la figura se muestra el nodo IoT el cual se compone por el microprocesador Esp32 y los sensores de humedad y temperatura. Elaboración propia

Así mismo, los sensores principales (pH, Temperatura/Humedad), se ubicaron al interior de la cámara, a una altura equivalente a un cuarto del diámetro de la sección circular, para asegurar que estos sean cubiertos por el mucilago de cacao y de esta forma proporcione información de las condiciones en su interior, tal como se observa en la Figura 24 y Figura 25.

**Figura 24** Sensor de temperatura y humedad SHT30



*Nota.* Elaboración propia. Fotografía del sensor de temperatura y humedad.

**Figura 25**

Sensor de pH PH4502C instalado en el interior de la tómbola



*Nota.* Elaboración propia. Fotografía del sensor de pH.

## 2.2. Programación y configuración

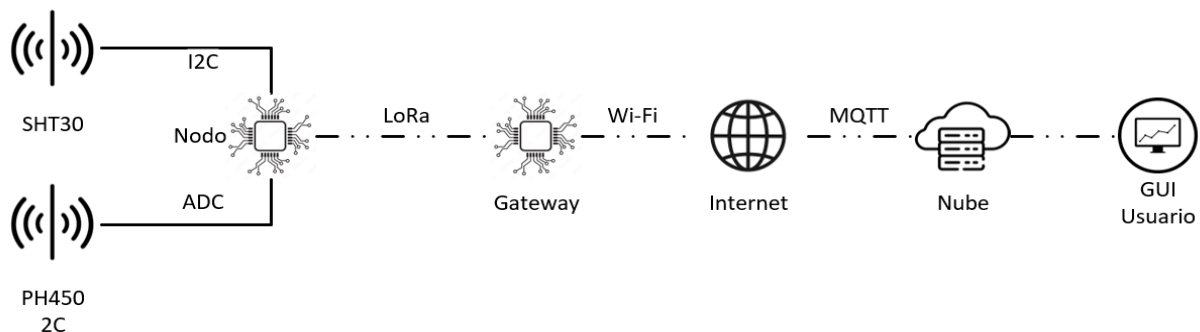
La implementación del prototipo propuesto, requirió (además del montaje y calibración de sensores), la configuración apropiada de los parámetros del canal de radio LoRa a utilizar, dentro de lo cual destaca lo siguiente:

- Frecuencia: 915 MHz
- Potencia de transmisión: 20 dBm
- Factor de propagación: 8
- Ancho de banda: 125 kHz
- Tasa de codificación: 5

La optimización de la configuración anterior, se basó en pruebas de campo que incluyeron detección de señal utilizando un analizador de espectro Tektronix RSA306B. Además, la programación de los protocolos de comunicación entre componentes, siguió la lógica descrita en la Figura 26.

**Figura 26**

Diagrama de comunicación entre dispositivos del sistema IoT



*Nota:* Elaboración propia en (Visio, 2024)

Ambos nodos fueron programados utilizando el entorno **Thonny IDE** y el lenguaje **MicroPython**, ideal para aplicaciones IoT gracias a su bajo consumo de recursos y facilidad de desarrollo.

Es necesario conocer las librerías para el control de sus respectivos chip LoRa integrados. A continuación, se muestra el código en Python para la inicialización de los radios LoRa, el del nodo y del gateway respectivamente.

### Figura 27

Sección de código en el ESP32 nodo para inicializar el radio LoRa

```

11. #Se inicializa una variable llamando una función de la librería SX127x definiendo
    los pines a utilizar en la placa ESP32.
12. sx = SX1262(spi_bus=1, clk= 9, mosi=10, miso=11, cs=8, irq=14, rst=12, gpio=13)
13.
14. #Se llama a un método de la función para aplicar distintas configuraciones
    aplicables al módulo de radio LoRa integrado en la placa ESP32.
15. #Se establece una frecuencia, ancho de banda, poder de transmisión, entre otras
    configuraciones.
16. sx.begin(freq=915, bw=125.0, sf=8, cr=5, syncWord=0x12,
17.           power=20, currentLimit=60.0, preambleLength=8,
18.           implicit=False, implicitLen=0xFF,
19.           crcOn=False, txIq=False, rxIq=False,
20.           tcxoVoltage=1.7, useRegulatorLDO=False, blocking=True)

```

*Nota.* Elaboración propia mediante el IDE de código abierto (Thonny 4, n.d.) para el lenguaje de programación micropython

### Figura 28

Inicialización de radio LoRa del ESP32 en el Gateway

```

1. #Se almacena en una variable las distintas configuraciones aplicables al módulo de
    radio LoRa integrado en la placa ESP32. Se establece una frecuencia, ancho de banda,
    poder de transmisión, entre otras configuraciones.
2. lora_params = {'frequency': 915000000, 'frequency_offset':0, 'tx_power_level': 20,
3.               'signal_bandwidth': 125e3, 'spreading_factor': 8, 'coding_rate': 5,
4.               'preamble_length': 8, 'implicitHeader': False, 'sync_word': 0x12,
5.               'enable_CRC': True, 'invert_IQ': False, 'debug': False,
6.               }
7.
8. #Se inicializa una variable llamando una función de la librería SX127x definiendo
    los pines a utilizar en la placa ESP32, utilizando los parámetros anteriormente
    definidos.
9. lora = SX127x(lora_spi, pins=lora_pins, parameters=lora_params)

```

*Nota.* Elaboración propia mediante el IDE de código abierto (Thonny 4, n.d.) para el lenguaje de programación micropython

Para establecer una comunicación entre el Gateway y la plataforma IoT, utilizando el protocolo MQTT, se ha utilizado la siguiente sección de código:

**Figura 29** Sección de código en el ESP32 Gateway

```

80.         #Se define una variable a partir de una función de la librería
umqtt.simple, donde se definen los parámetros del dispositivo en la plataforma
como la IP, el usuario o contraseña, el puerto a utilizar.
81.         client = MQTTClient("tombola", '195.179.231.58',
82.                               user = 'h36fyd3tu3mt8eafolq7', password = '',
83.                               port = 1883,
84.                               ssl = False#,
85.                               #ssl_params = ssl_params
86.                               )
87.         client.connect()

```

*Nota.* Elaboración propia mediante el IDE de código abierto (Thonny 4, n.d.) para el lenguaje de programación micropython, para crear el cliente MQTT que conecta con Thingsboard®, para su posterior conexión

### 2.3. Ajustes y mejoras realizadas

Luego de las primeras pruebas funcionales, se identificaron oportunidades clave de mejora tanto a nivel de hardware como de software. Se llevaron a cabo algunas acciones para optimizar la precisión y robustez del sistema.

#### 2.3.1. Calibración del sensor de pH

Luego de la verificación de su funcionamiento, fue necesaria la calibración del sensor de pH, para lo cual se utilizaron sustancias patrón. El proceso de calibración incluyó tomar medidas del valor digital obtenido de 3 valores de pH distintos, 4.01pH, 7.00pH y 10.01pH, con 3 soluciones buffer facilitadas por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES; con los valores obtenidos se modeló una función lineal, a la cual se debieron ajustar los otros valores de las muestras. Posteriormente, se realizaron distintas mediciones de cada solución buffer, para asegurar la estabilidad de las mediciones del sensor.

Los pasos seguidos en el proceso fueron:

- Limpieza de la probeta con agua destilada para eliminar cualquier rastro de sustancia anterior.
- Introducción de la probeta en sustancia con pH 4, pH 7 o pH 10.
- Esperar alrededor de 1 minuto para obtener un valor de pH estable.
- Tomar nota del valor obtenido mediante software para tomar punto de referencia, guardar en una variable.
- Repetir el proceso anterior para las soluciones restantes respectivamente

Teniendo los valores para las 3 soluciones de referencia, se procede a modelar una ecuación lineal con pendiente e intercepto.

### Figura 30

Soluciones buffer de pH utilizados para la calibración del sensor de pH



*Nota.* Elaboración propia. Fotografía de soluciones de pH para calibración de sensor de pH

### 2.3.2. Comparación del sensor de temperatura y humedad con instrumento de precisión:

Para el caso del sensor de temperatura, no se cuenta con un procedimiento específico de calibración, en su lugar, se optó por comparar sus lecturas con el medidor de temperatura y humedad portátil modelo HH414 de la marca Omega® proporcionado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador. Las características técnicas del HH414 se indican en la Tabla 6.

**Tabla 6***Características del sensor de precisión HH414*

Parámetro	Especificación
Tipo de sensor	Sonda combinada de temperatura/humedad (semiconductor y capacitivo)
Rango de temperatura (T1)	-20 °C a 60 °C
Precisión de temperatura (T1)	±0.6 °C
Rango de humedad relativa (RH)	0% a 99.9% RH
Precisión de humedad relativa	±2.5% RH (@25 °C, <70% RH), ±5% en otros rangos
Entrada adicional (T2)	Termopar tipo K (conector SMP)
Rango de temperatura (T2)	-200 °C a 1372 °C
Resolución	0.1 °C / 0.1% RH
Capacidad de almacenamiento	32,000 puntos de datos
Funciones adicionales	Alarmas de alta/baja, retención de datos, valores máximos/mínimos/promedio, reloj en tiempo real
Certificaciones	CE

*Nota.* Información recuperada de (Omega Engineering, 2025)

**Figura 31**

Sensor de temperatura de precisión HH414 utilizado como referencia



*Nota.* Elaboración propia. Fotografía de medidor de temperatura de referencia.

Dado a que, de acuerdo con las características del sensor, el mismo ya viene calibrado de fábrica, para efectos de validación de datos, se ha utilizado un termómetro de precisión, el cual la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad De El Salvador tiene en posesión, del fabricante Omega, modelo HH414, cuya última calibración fue el 30 de agosto del 2021.

Se compararon los resultados por un lapso de 2 horas con 15 minutos, con mediciones cada 15 minutos, los resultados se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Tabla comparativa entre sensor de precisión HH414 y sensor SHT30*

Hora	Sensor de precisión HH414	Sensor en tómbola SHT30
11:15	39.7	40.06
11:30	39.3	40.06
11:45	39.4	40.06
12:00	39.3	40.06
12:15	39.3	40.06
12:30	39.4	40.13
12:45	39.3	40.19
13:00	39.3	40.19
13:15	39.4	40.25
13:30	39.4	40.44

*Nota.* Elaboración propia. Comparación de mediciones entre sensores HH414 y SHT30.

Los resultados muestran una mínima diferencia de  $0.36^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $1.04^{\circ}\text{C}$ , cabe mencionar que ambos sensores tenían una separación entre ellos de alrededor de 3 centímetros. El sensor HH414 posee más precisión que el SHT30, la desviación promedio entre los datos de ambos sensores es  $0.79^{\circ}\text{C}$ . Si bien para esta aplicación no se requiere mayor precisión debido a que únicamente se monitoreará para tener una referencia a la etapa de fermentación en la que se encuentra, cabe recalcar que la última calibración del termómetro de referencia fue hace 3 años y 7 meses aproximadamente, por lo que los datos podrían tener menos desviación entre ellos.

### 2.3.3. Ajuste de parámetros LoRa

Se realizaron pruebas modificando parámetros de la transmisión LoRa, en particular:

- La **potencia de transmisión (Tx Power)** se configuró en niveles altos (hasta 20 dBm) para garantizar comunicación estable en entornos con interferencias estructurales. Estos cambios permitieron mejorar el RSSI promedio y reducir la tasa de pérdida de paquetes durante las pruebas prolongadas.

- El factor de expansión (**Spreading Factor (SF)**) se ajustó para optimizar el equilibrio entre alcance y tiempo de transmisión.

El cambio de factor de expansión se ajustó a 8 debido a que los paquetes de datos que se enviaban no eran lo suficientemente grandes, por lo que se pueden enviar mensajes más cortos en menor tiempo, generando un ahorro considerable de energía al sistema, a costa de saber que se reduce el alcance.

La energía utilizada al enviar un mensaje, sabiendo que la potencia de envío equivalente a 20dBm son 100mW, se calcula con la siguiente fórmula:

$$E = P_{tx} \cdot T_{tx}, \quad T_{tx} = \frac{\#S\u00edmbolos \cdot 2^{SF}}{BW}$$

La energía utilizada para una transmisión usando SF = 12.

$$E_{12} = 100mW \cdot \frac{20 \cdot 2^{12}}{125k} = 65.5mJ$$

La energía utilizada para una transmisión usando SF = 8.

$$E_8 = 100mW \cdot \frac{20 \cdot 2^8}{125k} = 4.1mJ$$

La diferencia de energía utilizada es:

$$\Delta E = \frac{65.5 - 4.1}{4.1} 100\% = 1500\%, \quad 16 \text{ veces mayor}$$

### 2.3.4. Manejo de errores y reinicios automáticos

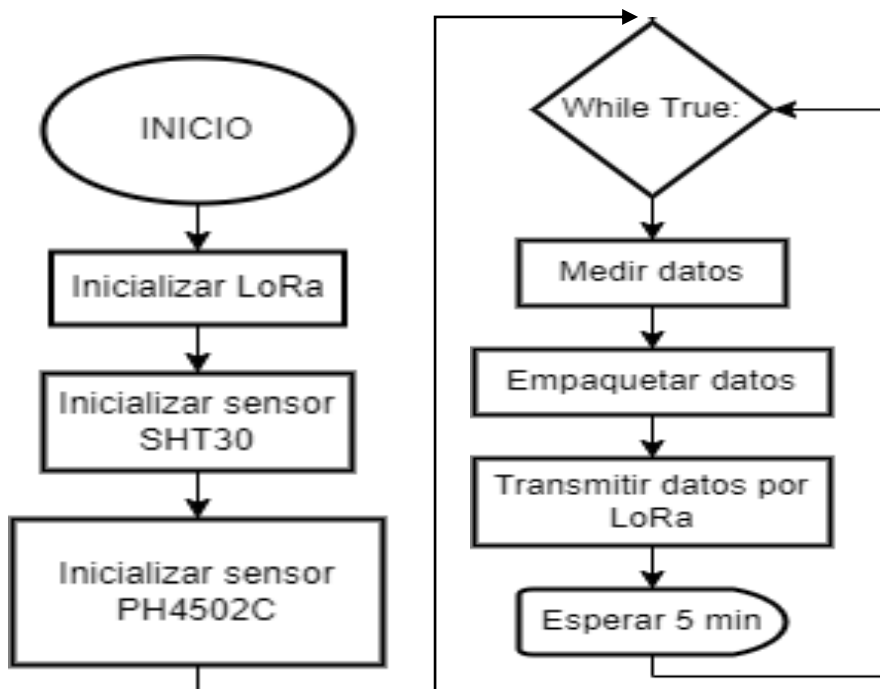
Para mejorar la estabilidad del sistema, especialmente en el nodo receptor, se implementaron múltiples bloques try/except en puntos críticos del código:

- Lectura de sensores.
- Envío de datos por MQTT.
- Conexión a WiFi.
- Sincronización de hora.

Esto evitó que errores intermitentes causaran **bloqueos o reinicios manuales**, permitiendo una operación continua sin intervención del usuario. Los diagramas de flujo optimizados de ambos, el nodo y el Gateway se muestran en la Figura 32 y Figura 33.

**Figura 32**

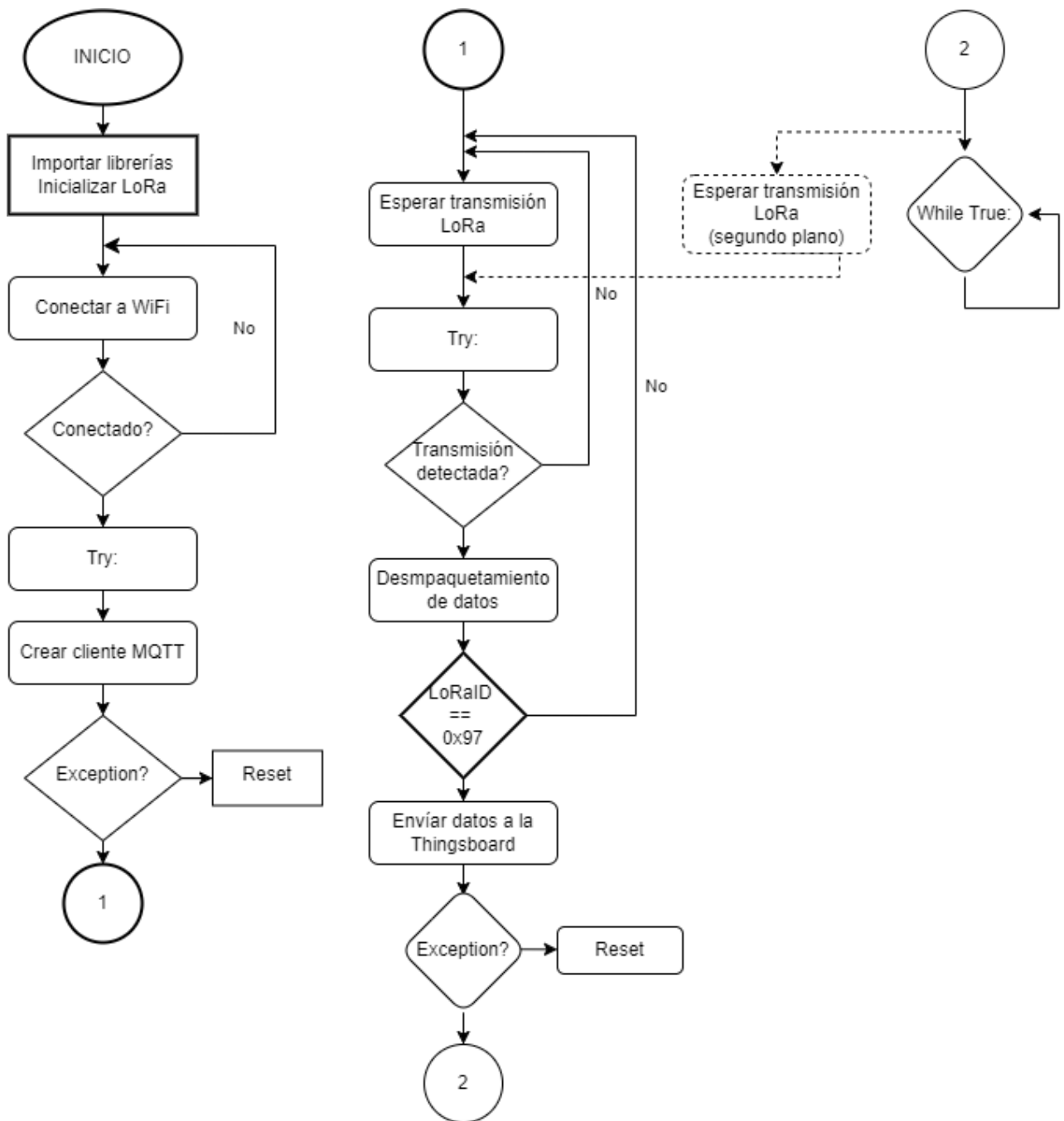
Flujograma de la programación del ESP32 nodo con sensores



*Nota.* Elaboración propia. Flujograma de trabajo del ESP32 transmisor de datos.

Figura 33

Flujograma de la programación del ESP32 Gateway



*Nota.* Elaboración propia. Flujo de trabajo del ESP32 Gateway

## 2.4. Pruebas de funcionamiento en entorno controlado

Aunque el sistema fue diseñado para ser desplegado en una finca cacaotera rural, las pruebas funcionales se realizaron en un entorno controlado (laboratorio o área cerrada), replicando condiciones similares de temperatura y humedad al proceso de fermentación.

El nodo sensor fue ubicado a corta distancia de un recipiente que simulaba la cámara de fermentación (tómbola), mientras que el nodo receptor se colocó a una distancia de aproximadamente 10 metros, en línea de vista, para asegurar una buena comunicación inicial mediante LoRa.

Para la validación del funcionamiento del sistema, se adquirieron alrededor de 250 mazorcas de cacao, las cuales proporcionaron un aproximado de 120 libras de producto. La Figura 34 muestra el proceso de extracción de semillas, previo a su colocación al interior del tambor.

### Figura 34

Extracción de las semillas de las mazorcas de cacao



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 35**

Pruebas de la cantidad de azúcar en la baba de cacao



*Nota.* Elaboración propia. Prueba de cantidad de azúcar en el mucílago del cacao mediante refractómetro.

**Figura 36**

Fin del proceso de extracción de mazorcas de cacao

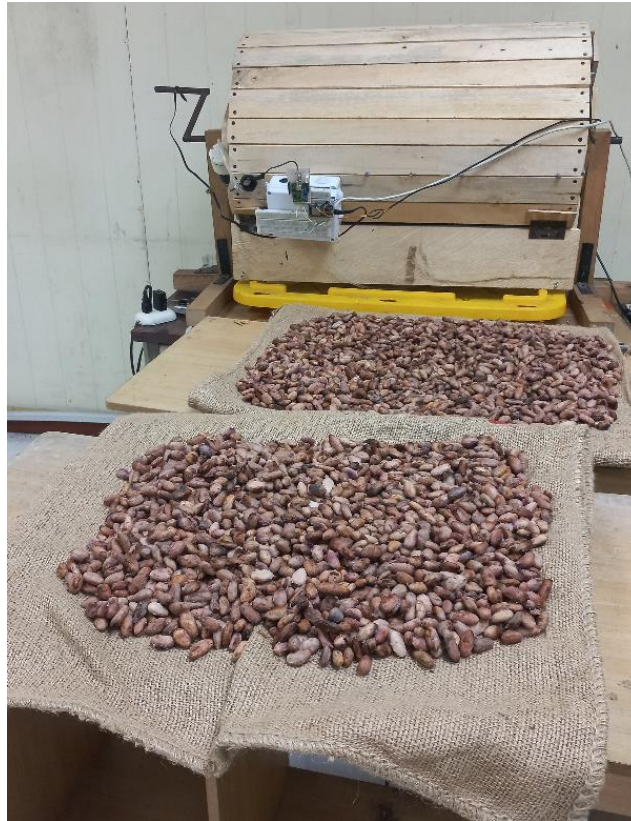


*Nota.* Elaboración propia. Fin de extracción de la semilla de cacao

Luego de finalizar el periodo de fermentación (alrededor de 6 días), las semillas de cacao se extrajeron del tambor, como lo muestra la Figura 37.

### Figura 37

Semillas de cacao luego de su extracción de la tómbola



*Nota.* En la figura se observa los granos de cacao extraídos del fermentador una vez concluido el proceso de fermentación. Elaboración propia

Para demostrar las capacidades del prototipo, se programó la medición y envío de datos cada 5 minutos, por un margen de 5 días, lo que generó datos suficientes para su análisis posterior. La estructura de los datos obtenidos en todo el período de medición, ver Tabla 8.

**Tabla 8***Ejemplo de los datos registrados por el prototipo IoT*

DATE	pH	TEMP AMBIENTE	TEMP MOSTO
15/2/2025 22:00	6.33	29.75	31.00
15/2/2025 22:05	6.29	29.75	31.00
15/2/2025 22:10	6.30	29.81	31.00
15/2/2025 22:15	6.28	29.88	31.10
15/2/2025 22:20	6.29	29.94	31.00
15/2/2025 22:25	6.31	29.94	31.20
15/2/2025 22:30	6.33	30.06	31.20
15/2/2025 22:35	6.28	30.06	31.30
15/2/2025 22:40	6.30	30.13	31.30
15/2/2025 22:45	6.35	30.19	31.40
15/2/2025 22:50	6.36	30.25	31.40
15/2/2025 22:55	6.33	30.25	31.50
15/2/2025 23:00	6.29	30.31	31.50
15/2/2025 23:05	6.31	30.31	31.50
15/2/2025 23:10	6.35	30.38	31.50
15/2/2025 23:15	6.35	30.44	31.60
15/2/2025 23:20	6.36	30.44	31.60
15/2/2025 23:25	6.35	30.50	31.60
15/2/2025 23:30	6.33	30.56	31.60
15/2/2025 23:35	6.36	30.56	31.70
15/2/2025 23:40	6.36	30.63	31.70
15/2/2025 23:45	6.33	30.63	31.70

*Nota.* Elaboración propia. Resultados del prototipo del sistema de monitoreo IoT.

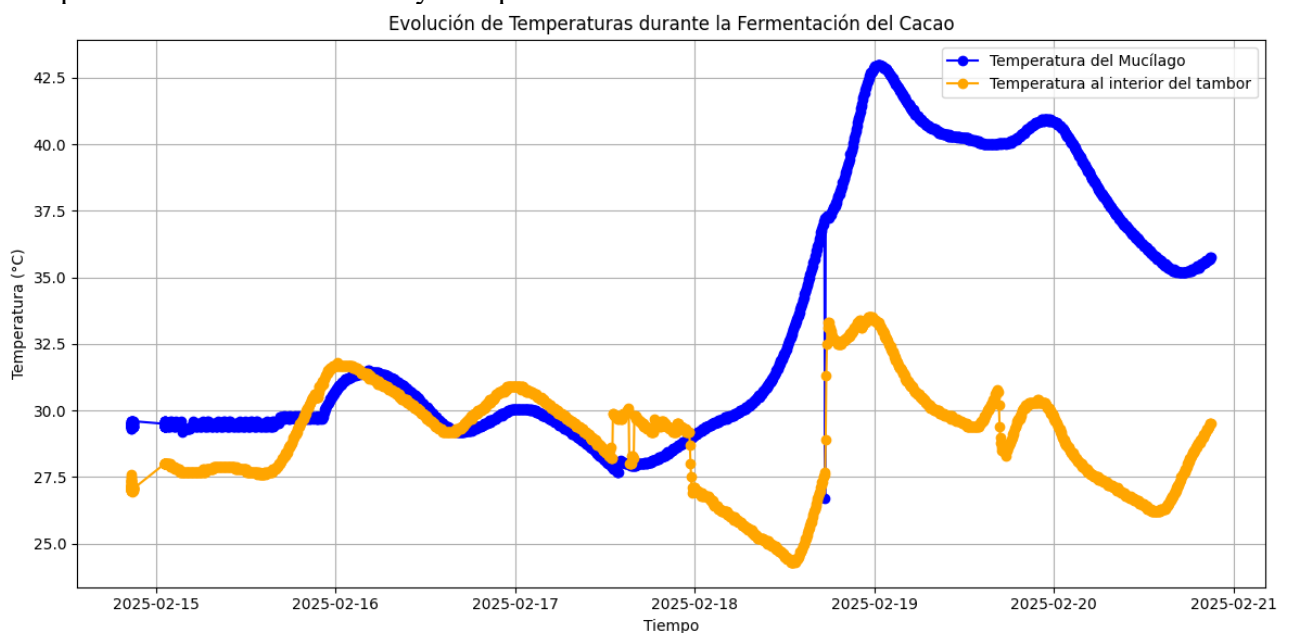
### CAPÍTULO 3: RESULTADOS

Como se indicó al inicio, el objetivo principal de este trabajo, era demostrar la viabilidad de uso de las tecnologías IoT, en aplicaciones como la evaluación del proceso de fermentación del cacao. En (Steinau-Dueñas et al., 2017) se detalla una investigación de este tipo realizada en el 2016, por docentes de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador; en dicha investigación se describe el procedimiento de adquisición de datos, así como la ubicación de los sitios bajo prueba; es de hacer notar que la toma de datos se hacía cada 24 horas y las lecturas debía hacerse localmente.

Con el prototipo propuesto en el presente trabajo, se tiene la ventaja que la frecuencia temporal de la toma de datos a partir de las muestras, se puede ajustar conforme a las necesidades y que, además, se pueden monitorear remotamente todos los sitios de interés, facilitando con ello tanto el análisis inmediato de la información, como evaluaciones posteriores de la misma. Como ejemplo, se presentan a continuación algunas de las gráficas generadas a partir de los datos recopilados, con las cuales podemos realizar algunos análisis y comparaciones estadísticas relevantes.

**Figura 38**

Temperatura interna del tambor y Temperatura interna del cacao

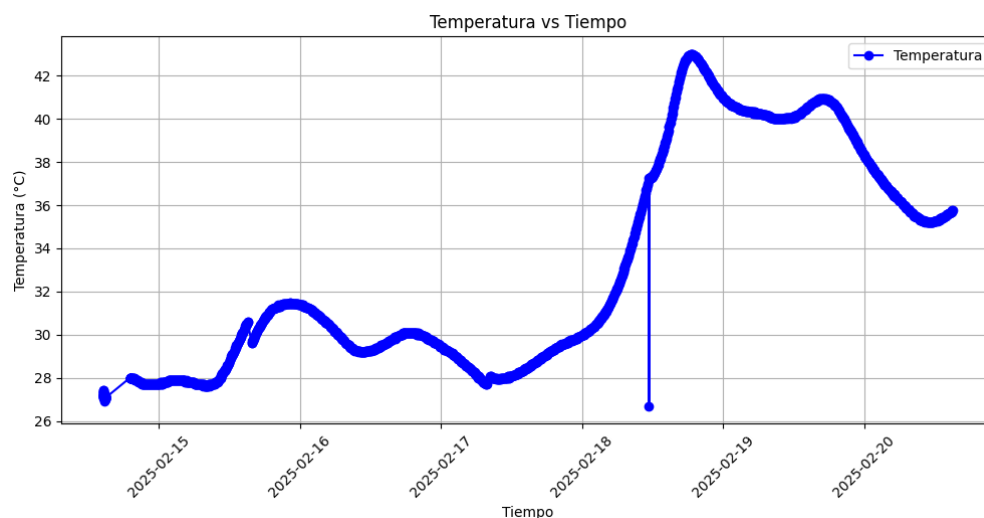


*Nota. Elaboración propia utilizando (Google Colab, 2025)*

En la Figura 38 muestra el comportamiento de la temperatura al interior del tambor y la temperatura del mucílago o el grano de cacao en baba, inicialmente poseen ambas mediciones oscilan en un rango similar de temperatura de alrededor de 27.5 °C a 31 °C, en los primeros días de fermentación, en cuanto a los saltos de temperatura en la temperatura al interior del tambor son debido a la apertura y cierre de la tapa del fermentador, con el fin de monitoreo del funcionamiento correcto de los sensores y toma de mediciones, podemos notar que ambas mediciones siguen un patrón de temperatura muy parecido, esto indica que si el fermentador posee algún tipo de fuga o abertura al interior, se tendrá un efecto directo en la temperatura del grano de cacao en fermentación.

### Figura 39

Gráfico de Temperatura vs tiempo de Fermentación



*Nota. Elaboración propia utilizando (Google Colab, 2025)*

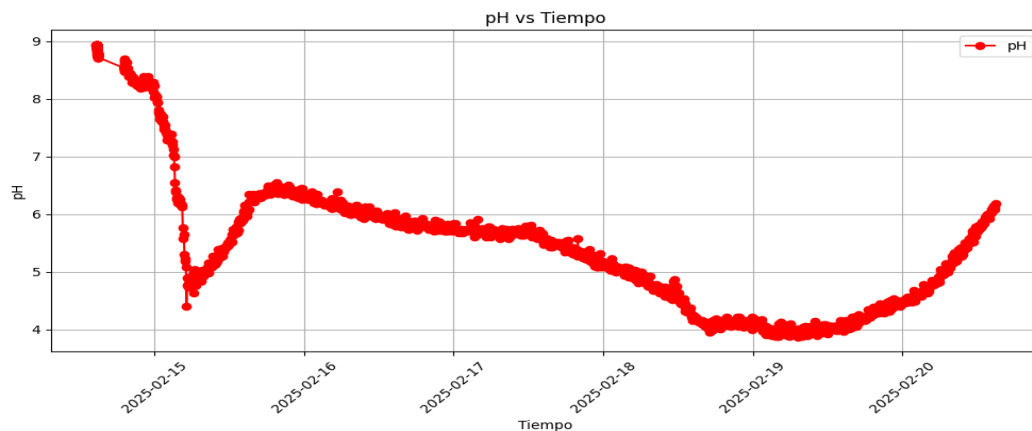
La Figura 39 muestra la medición de la temperatura interna del mucílago en fermentación. En la gráfica se observa que la temperatura inicial es de 28 °C, alcanzando su punto máximo el cuarto día, con un valor de 43 °C. Entre el quinto y el sexto día, el proceso de fermentación llega a su fin. Se aprecia que la temperatura desciende hasta un valor aproximado de 35 °C.

Según los estudios consultados, se debe alcanzar una temperatura entre 40 °C y 45 °C para que el proceso de fermentación sea considerado aceptable. A pesar de la limitante de no contar con el volumen suficiente de grano de cacao en baba para llenar el tambor giratorio a su capacidad nominal, se optó por cubrir los montones de cacao con sacos de yute, con el fin de elevar ligeramente la temperatura interna. Esto permitió obtener lecturas de temperatura más altas y verificar el funcionamiento adecuado del sensor.

Esta gráfica puede servir como punto de partida para identificar momentos clave en los que se deben realizar volteos o remociones de la masa de cacao. Gráficamente, se observan zonas con discontinuidades en la traza, lo que indica visualmente que hubo una remoción de la masa de cacao en fermentación para permitir una distribución de la temperatura en todo el grano.

**Figura 40**

Gráfico de pH vs tiempo de Fermentación



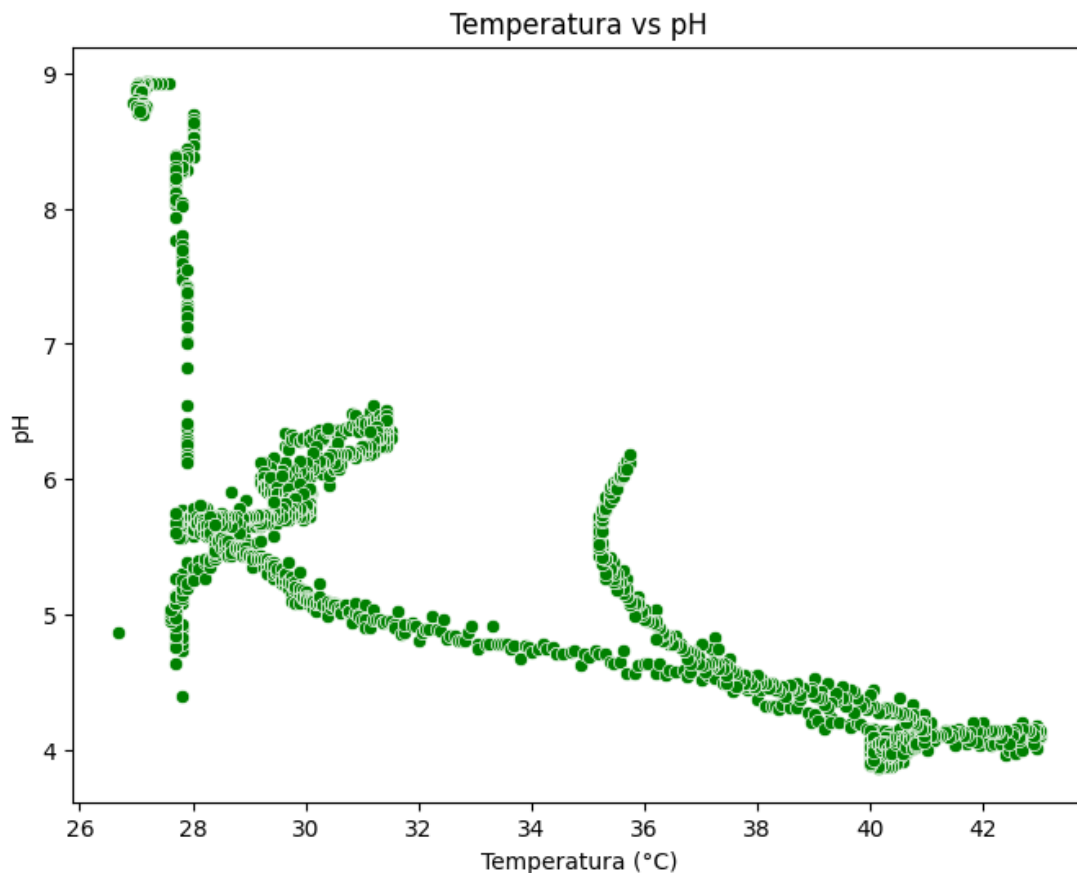
*Nota.* Elaboración propia utilizando (Google Colab, 2025)

Se puede observar en la traza (ver Figura 40) que, durante el proceso de fermentación, el pH tiende a disminuir a medida que transcurre el tiempo. Teóricamente, se considera un rango de pH de 4.0 a 5.2 como óptimo para obtener un grano de cacao de buena calidad y aroma. En las mediciones realizadas, este rango se alcanza entre los días 18 y 19, donde los valores oscilan entre 4.0 y 5.0, respectivamente.

Por lo tanto, la traza puede servir como punto de partida para identificar y estimar si es necesario acortar o prolongar el tiempo de fermentación, con el fin de obtener la mejor calidad de cacao, basándose en los rangos óptimos de pH definidos por referencias o por datos previamente recopilados de otros procesos similares e integrando las demás variables medidas en el proceso de fermentación.

**Figura 41**

Gráfico de Temperatura vs pH



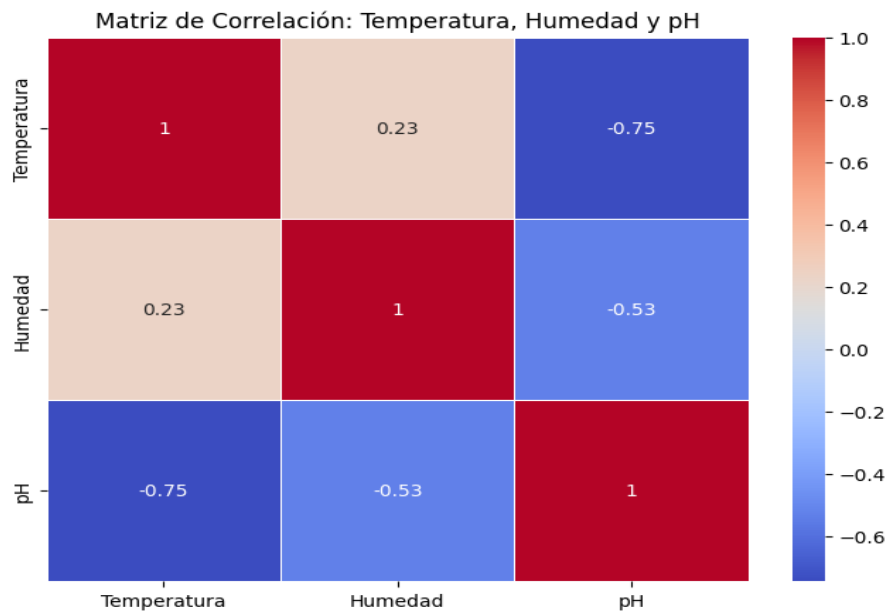
*Nota.* Elaboración propia utilizando (Google Colab, 2025)

Se puede observar (ver Figura 41), que en el rango de 38 °C a 43 °C se tiene un valor de pH que oscila entre 4 y 5, se aprecia además que la relación entre ambas variables, es inversamente proporcional entre sí, esto conlleva a reafirmar que mientras la temperatura de la masa de cacao aumenta, el pH disminuye a tal punto que podemos identificar el momento oportuno para intervenir en el proceso.

Además, se puede notar que la disminución de pH luego de pasar a una temperatura mayor a los 31 °C la tendencia se vuelve aproximadamente lineal con pendiente negativa, hasta llegar a la temperatura máxima de 43 °C donde el pH nuevamente oscila con valores entre 4 y 5.

### Figura 42

Diagrama de correlación para: temperatura, pH y humedad relativa

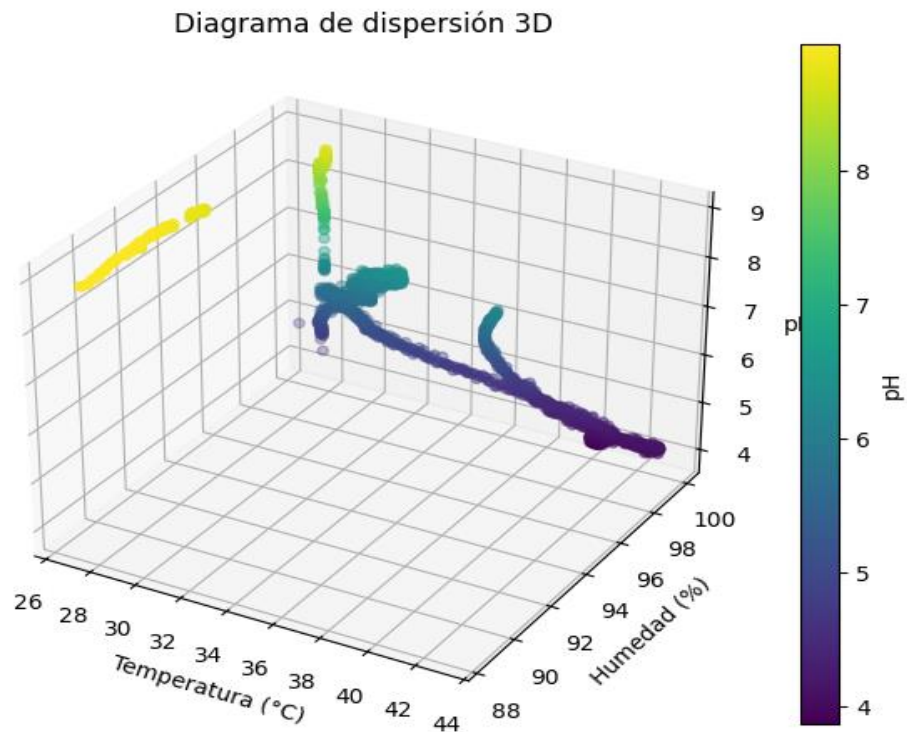


*Nota.* Elaboración propia utilizando (Google Colab, 2025)

En este tipo de gráfico (ver Figura 42). se entiende que cuanto más cerca de la unidad se encuentre la relación de 2 variables, tiene más peso la relación entre ellas y su comportamiento tiende a generar una relación directa o inversamente proporcional, dependiendo si el valor es positivo o negativo, es decir, si es un valor positivo, las variables tienen una relación directamente proporcional, si la correlación es un valor negativo, las variables poseen una relación inversamente proporcional, como lo es la temperatura con el pH, a mayor temperatura, se tiene un menor pH. En nuestro caso, la temperatura versus el pH tiene una correlación de -0.75, en cuanto a la correlación de temperatura y humedad se tiene una correlación débil de 0.23 y por último se tiene una correlación de -0.53 para la humedad versus el pH.

**Figura 43**

Diagrama de dispersión de las variables: temperatura, pH y humedad relativa



*Nota.* Elaboración propia utilizando (Google Colab, 2025)

En la gráfica (ver Figura 43), se tienen los resultados de las 3 variables de interés para el monitoreo del proceso de fermentación, en cuanto al rango óptimo de pH discutido, se facilita el identificar mediante un color morado oscuro, señalando un rango de 4 a 5, y se utiliza una escala como esa para tener facilidad de comunicar el estatus del proceso de fermentación a un productor, por ejemplo. Otro uso importante es la comparación de diferentes procesos de fermentación con diferentes tipos de cacao, dado que, cada proceso de fermentación generaría un gráfico en 3D.

## CONCLUSIONES

Después de haber realizado el experimento, podemos concluir:

- En las primeras 48 horas del proceso de fermentación, se esperaba que la temperatura interna del mucilago de cacao, incrementara su valor desde el rango de 27°C-29°C hasta los 36 °C-38 °C no obstante, el sensor instalado mostró que esto no fue posible y un especialista consultado (Ing. Agr. Erick Christopher Guardado Derás, docente de la Facultad de Agronomía de la UES), indicó que la causa principal, fue la cantidad de cacao que se colocó al interior del tambor, misma que no superó el 30% de la capacidad de dicho contenedor. Como método de corrección, sugirió realizar volteos manuales de la mezcla, lo que propició la reacción esperada reflejándose en el dato de temperatura interna, que mostró una variación desde los 28 °C al inicio del tercer día, hasta un valor pico de 44 °C en el cuarto día de fermentación, lo cual es indicativo de que este proceso se desarrolla conforme a lo esperado; esto demuestra la importancia del monitoreo constante de estos parámetros, lo que ayuda a tomar acciones correctivas de forma oportuna. Así mismo, el prototipo desarrollado, incluyó sensores de temperatura interna del tambor y de temperatura interna del mucilago, pero no se consideró el uso de sensores de las condiciones ambientales del sitio en el cual se instaló el tambor, lo cual es importante para evaluar la influencia de estas condiciones en los procesos de tratamiento pos cosecha del cacao, lo que debería tomarse en cuenta en ensayos futuros.
- En cuanto al comportamiento del pH, se lograron apreciar las variaciones esperadas con oscilaciones entre los 4.5 hasta los 6.7, aproximadamente y tendencia a estabilizar al final del proceso. De acuerdo a otros estudios, el comportamiento de este parámetro también depende de la variedad de cacao utilizada y de la temperatura ambiente, la cual juega un papel importante en la fermentación, impactando la velocidad y calidad del proceso. Las variables anteriores no fueron incluidas en este estudio, por cual es algo que se debería considerar a futuro.
- En cuanto a las características de propagación de la tecnología LoRa, las mediciones de intensidad de campo eléctrico realizadas en distintos puntos al interior de la UES (como se ejemplifica en la Figura 17), mostraron que el procesamiento de información se mantuvo estable hasta un nivel de señal cercano a -130dBm, lo que para entornos rurales

propios de El Salvador, implica un alcance de entre 2 y 2.5Km, sin lluvia presente, lo que es adecuado para la mayoría de lugares en donde se procesa cacao. Este tipo de mediciones se deberían complementar, con la recopilación de datos en época de lluvia, para tener un panorama más amplio del comportamiento de este parámetro en nuestro entorno.

## RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar pruebas en diferentes zonas geográficas productoras de cacao, para efecto de validar el desempeño en diferentes condiciones climáticas y geográficas. Esto permitirá realizar ajustes y parámetros de referencia en cuanto a la transmisión de la información y dimensionar el alcance de cobertura del sistema de monitoreo IoT.
- Se recomienda realizar pruebas con diferentes variedades de cacao, lo cual permitirá analizar diferencias en los patrones de temperatura, pH y humedad relativa, contribuyendo a procesos de análisis posteriores, por ejemplo, mediante modelos de aprendizaje automático (Machine Learning) que predigan comportamientos anómalos en la fermentación, o clasificar etapas de fermentación del cacao.
- Se recomienda mejorar la eficiencia energética de todo el sistema de monitoreo, por ejemplo, el uso o inclusión de fuentes de energía renovable como paneles solares, los cuales aumentaría la autonomía del funcionamiento del sistema de monitoreo en el tiempo.
- Se sugiere implementar mecanismos de procesos automatizados en tiempo real que permitan acciones correctivas en el proceso de fermentación, a partir de los datos censados en tiempo real. Por ejemplo, mecanismos de ventilación, regulación de humedad o mecanismos de regulación de temperatura interna de la cámara del fermentador.
- Se sugiere incluir más variables de estudio para enriquecer la recolección de datos con patrones de fermentación más completos, por ejemplo, sensores de CO<sub>2</sub>, sensores para medición de grados brix, sensores para medición de concentración de oxígeno O<sub>2</sub> y sensores de concentración de etanol.
- Se sugiere el desarrollo de aplicaciones móviles android para la visualización de todo el proceso en tiempo real.

## REFERENCIAS

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, *17*, 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Alves Rodrigues, J. P., Varella, W. A., De Oliveira, A. M., & Carvalho, A. (2025). *LORAWAN RANGE ESTIMATION BY LARGE SCALE EMPIRICAL OUTDOOR PROPAGATION MODELS*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15458479>
- Amazon. (n.d.). *Amazon.com: POCREATION Temperature Humidity Sensor, I2C Output FS400-SHT3X Temperature Humidity Sensor Digital Thermal Soil Probe Stainless Steel Plastic Housing for Computer Room, Warehouse (SHT30): Industrial & Scientific*. [https://www.amazon.com/Dp/B0DKWY6J6R?ref=cm\\_sw\\_r\\_cp\\_ud\\_dp\\_YG01ZNRSW953H6DFKC00&ref\\_=cm\\_sw\\_r\\_cp\\_ud\\_dp\\_YG01ZNRSW953H6DFKC00&social\\_share=cm\\_sw\\_r\\_cp\\_ud\\_dp\\_YG01ZNRSW953H6DFKC00&previewDoh=1&th=1](https://www.amazon.com/Dp/B0DKWY6J6R?ref=cm_sw_r_cp_ud_dp_YG01ZNRSW953H6DFKC00&ref_=cm_sw_r_cp_ud_dp_YG01ZNRSW953H6DFKC00&social_share=cm_sw_r_cp_ud_dp_YG01ZNRSW953H6DFKC00&previewDoh=1&th=1).
- Amazon Web Services. (2024). *¿Qué es IoT? - Explicación del Internet de las cosas - AWS*. <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>.
- Arias Argueta, E. A., & Orozco Mejía, D. I. (2024). Diseño e implementación de un prototipo de red de comunicación de sensores utilizando tecnología de radios de largo alcance. In <https://repositorio.ues.edu.sv/items/eef962f2-f93e-4825-a08e-8e4e137e1a7f>.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, *54*, 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Bertoletti, P. (2019). *Proyectos com ESP32 y LoRa*. <https://books.google.com.ec/books?id=Doi0DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- Calvo, A. M., Botina, B. L., García, M. C., Cardona, W. A., Montenegro, A. C., & Criollo, J. (2021). Dynamics of cocoa fermentation and its effect on quality. *Scientific Reports*, *11*. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95703-2>
- Canva. (n.d.). *Canva: una Suite Visual para todo el mundo*. [https://www.canva.com/es\\_es/](https://www.canva.com/es_es/).

- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23, 60–67. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
- Chávez-Santamaría, J., Rodríguez-Urrutia, E., Molina-Escalante, M., & Lovo Lara, L. (n.d.). *Procesamiento artesanal de cacao (Theobroma cacao L.) y café (Coffea arabica) Handmade processing of cocoa (Theobroma cacao L.) and coffee (Coffea arabica)*. <https://revistaagrociencia.wordpress.com/>
- Chen, Y., Zhao, S., & Zhou, Y. (2018). Research on Intelligent Agricultural Planting System Based on Internet of Things Technology. *Scirp.Irg*, 3169–3177. <https://doi.org/10.4236/jcc.2018.66005>
- DFRobot. (n.d.). *PH meter SKU SEN0161*. [https://Wiki.Dfrobot.Com/PH\\_meter\\_SKU\\_\\_SEN0161\\_](https://Wiki.Dfrobot.Com/PH_meter_SKU__SEN0161_).
- DLN Energy. (n.d.). *Ficha Técnica de la Batería de Litio 18650 - Bateria 18650*. <https://Bateria18650.Com/Ficha-Tecnica-de-La-Bateria-de-Litio-18650/>.
- ElectronicWings. (2024). *ADC of ESP32 | ESP32*. <https://Www.Electronicwings.Com/Esp32/Adc-of-Esp32>.
- Erazo Gavilánez, C. Y., & Gallegos Eras, W. E. (2019, April). *Diseño de un fermentador y secador solar piloto, para dos variedades de cacao (Theobroma cacao L), en el cantón El empalme provincia Guayas*. <https://Repositorio.Uisek.Edu.Ec/Handle/123456789/3361>.
- ESPRESSIF. (2025). *Inter-Integrated Circuit (I2C)*. <https://Docs.Espressif.Com/Projects/Esp-Idf/En/Stable/Esp32/Api-Reference/Peripherals/I2c.Html>.
- Espressif Systems. (2025). *ESP32*. <https://Www.Espressif.Com/En/Products/Socs/Esp32>.
- Freepik. (n.d.). *Freepik | Crea diseños increíbles, más rápido*. <https://Www.Freepik.Es/>.
- Gámez López, M. de J. (2018). *Prototipo electrónico de control y monitoreo de parámetros ambientales implementando Internet de las Cosas*. [https://Www.Itca.Edu.Sv/Wp-Content/Uploads/2018/11/RevistaTecnologica2018\\_F.Pdf?Utm\\_source=chatgpt.Com](https://Www.Itca.Edu.Sv/Wp-Content/Uploads/2018/11/RevistaTecnologica2018_F.Pdf?Utm_source=chatgpt.Com).
- González Orjuela, S. (2021). *Revisión de métodos para la fermentación de cacao y análisis de la fermentación combinada de cacao criollo y forastero*. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/22265>
- Google Colab. (2025). *Google Colab*. <https://Colab.Google/>.

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29, 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Heltec Automation. (2023a). *WiFi LoRa 32(V2), ESP32 + SX1262 LoRa Node, Meshtastic and LoRaWAN compatible — Phaseout*. <https://Heltec.Org/Project/Wifi-Lora-32v2/>.
- Heltec Automation. (2023b). *Wireless Stick(V3), ESP32S3 + SX1262 LoRa Node, Meshtastic and LoRaWAN Compatible*. <https://Heltec.Org/Project/Wireless-Stick-V3/>.
- Hernando Rábanos, J. M., Mendo Tomás, L., & Riera Salís, J. M. (2015). Comunicaciones móviles. In [https://www.cerasa.es/libro/comunicaciones-moviles\\_49698/](https://www.cerasa.es/libro/comunicaciones-moviles_49698/) (3rd ed.).
- iStockphoto LP. (n.d.). *Imágenes de stock, imágenes libres de derechos, ilustraciones, vectores y videos - iStock*. <https://www.istockphoto.com/es>.
- La Prensa Gráfica. (2016, October 7). Guatajiagua tiene el primer proyecto piloto “Smart Agro.” <https://www.laprensagrafica.com/ElSalvador/Guatajiagua-Tiene-El-Primer-Proyecto-Piloto-Smart-Agro-20181007-0010.html>.
- Lambert, J. D. (2013). Cocoa and human health. In *Molecular Nutrition and Food Research* (Vol. 57, pp. 933–933). <https://doi.org/10.1002/mnfr.201370054>
- LoRa Alliance®. (2025). *About LoRaWAN® - LoRa Alliance®*. <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>.
- Manual del router Huawei B311-221*. (2022). <https://www.manual.sv/huawei/b311-221/manual>.
- Naveen, S., & Hedge, S. G. (2010). (PDF) *Study of IoT: Understanding IoT Architecture, Applications, Issues and Challenges*. [https://www.researchgate.net/publication/330501274\\_Study\\_of\\_IoT\\_Understanding\\_IoT\\_Architecture\\_Applications\\_Issues\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/330501274_Study_of_IoT_Understanding_IoT_Architecture_Applications_Issues_and_Challenges)
- Ntlatlapa, N. (2007, July). *Energy-efficient wireless mesh networks*. [https://www.researchgate.net/publication/30510244\\_Energy-Efficient\\_wireless\\_mesh\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/30510244_Energy-Efficient_wireless_mesh_networks).
- Omega Engineering. (2025). *Temperature & Humidity Meter with Data Logger*. <https://es.omega.com/pptst/HH414.html>.
- Pérez, Q., Contreras, T., & Cueva, A. (2019). “La investigación al servicio de la producción.” 8. <http://www.sodiaf.org.do/revista/index.php>

- Pngtree. (n.d.). *Millions of PNG Images, Backgrounds and Vectors for Free Download* | Pngtree.  
[https://Pngtree.Com/?Source\\_id=17025&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=20404118111&gbraid=0AAAAADNQ42xsVvN6wOv-Xxoow4UP1AnDG&gclid=Cj0KCQjwIMfABhCWARIsADGXdy921GHVUhSIK5fMJeAJueNeLmLb\\_\\_yxybCMmYBnsfQWuQP5m75X3iQaAqkHEALw\\_wcB](https://Pngtree.Com/?Source_id=17025&gad_source=1&gad_campaignid=20404118111&gbraid=0AAAAADNQ42xsVvN6wOv-Xxoow4UP1AnDG&gclid=Cj0KCQjwIMfABhCWARIsADGXdy921GHVUhSIK5fMJeAJueNeLmLb__yxybCMmYBnsfQWuQP5m75X3iQaAqkHEALw_wcB).
- Ray, P. P. (2017). Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9, 395–420.  
<https://doi.org/10.3233/AIS-170440>
- Rayes, A., & Salam, S. (2019). Internet of Things From Hype to Reality: The Road to Digitization. In *Internet of Things from Hype to Reality: the Road to Digitization, Second Edition*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99516-8>
- Sensirion AG. (n.d.). *SHT30-DIS-F - ±2% Digital humidity and temperature sensor with filter membrane*. <https://Sensirion.Com/Products/Catalog/SHT30-DIS-F>.
- SIGET. (2004). *CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS (CNAF)*.
- Sinha, R. S., Wei, Y., & Hwang, S. H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. In *ICT Express* (Vol. 3, pp. 14–21). Korean Institute of Communications Information Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- Steinau-Dueñas, I. A., González-Rosales, S. O., & Castañeda-de-Abrego, V. (2017). *Evaluación de la incidencia de la fermentación en la calidad del grano de cacao trinitario en Caluco, Sonsonate, El Salvador*.  
<https://Revistas.Ues.Edu.Sv/Index.Php/Agrociencia/Article/View/716>.  
<https://revistas.ues.edu.sv/index.php/agrociencia/article/view/716/630>
- Teneda Llerena, W. F. (2016). William Fabián Teneda Llerena Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao (*Theobroma cacao* L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51. In [https://www.academia.edu/36423772/William\\_Fabi%C3%A1n\\_Teneda\\_Llerena\\_Mejoramiento\\_del\\_Proceso\\_de\\_Fermentaci%C3%B3n\\_del\\_Cacao\\_Theobroma\\_cacao\\_L\\_Variedad\\_Nacional\\_y\\_Variedad\\_CCN51](https://www.academia.edu/36423772/William_Fabi%C3%A1n_Teneda_Llerena_Mejoramiento_del_Proceso_de_Fermentaci%C3%B3n_del_Cacao_Theobroma_cacao_L_Variedad_Nacional_y_Variedad_CCN51).
- Thingsboard. (2025a). *MQTT Device API Reference*.  
<https://Thingsboard.Io/Docs/Reference/Mqtt-Api/>.
- Thingsboard. (2025b). *Security (MQTT)*. <https://Thingsboard.Io/Docs/Mqtt-Broker/Security/>.

- Thingsboard. (2025c). *What is ThingsBoard?* <https://Thingsboard.io/Docs/Getting-Started-Guides/What-Is-Thingsboard/>.
- Thonny 4. (n.d.). *Thonny Python IDE for beginners* (4.1.7). Aivar Annamaa.
- UNIT Electronics. (n.d.). *PH-4502C Sensor de PH Liquido con electrodo E201-BNC*. <https://Uelectronics.Com/Producto/Sensor-de-Ph-Liquido/?SrsIid=AfmBOoogQBY5V-1D69Ii-X8oqikbDQsdXQKGvnPVgwK6Z4EPHsTZQ4Uj>.
- Universidad Don Bosco. (2019, April 9). *Internet de las Cosas: desarrollo de tecnología para un estilo de vida inteligente*. <https://Www.Udb.Edu.Sv/Udb/Noticia/1255>.
- Verdouw, C. N., Wolfert, J., Beulens, A. J. M., & Rialland, A. (2016). Virtualization of food supply chains with the internet of things. *Journal of Food Engineering*, 176, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009>
- Vermesan, O., & Friess, P. (n.d.). *Internet of Things-From Research and Innovation to Market Deployment*. <http://riverpublishers.com/river>
- Visio. (2024). *Software de diagramación y creación de diagramas de flujo* (2024). Microsoft Office.
- Wilches, S. (2023). *Propuesta de arquitectura de IoT para cultivos de cacao*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/50168/2023sebastianwilches.pdf?sequence=1&isAllowed=y>