

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA IOT PARA
EL MONITOREO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EN TEMPERATURA
Y HUMEDAD EN LA CIUDAD DE TACNA - 2026

PRESENTADA POR:

EDWIN ERASMO ANAHUA ORDOÑO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2026



Repositorio Institucional ALCIRA by Universidad Privada San Carlos is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



0.94%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 6 JUL 2026, 10:37 AM

Originality & Authorship Report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

IDENTICAL
0.29%

CHANGED TEXT
0.64%

Report #34051067

EDWIN ERASMO ANAHUA ORDOÑO // EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA IOT PARA EL MONITOREO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EN TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA CIUDAD DE TACNA - 2026 RESUMEN La presente investigación tiene por objeto examinar la factibilidad técnica de utilizar tecnología IoT para monitorear al mismo tiempo la humedad y la temperatura en Tacna. La investigación surge de la necesidad de tener opciones tecnológicas asequibles que posibiliten el complemento de los sistemas tradicionales de monitoreo meteorológico, mediante la obtención, comunicación y visualización remota de datos en tiempo real. Se aplicó una metodología de enfoque cuantitativo, con un nivel aplicado y un diseño no experimental que es descriptivo-correlacional. Se creó un sistema de Internet de las Cosas (IoT) que emplea una placa ESP32 con conectividad WiFi, los sensores DHT22 y DHT11, así como una plataforma para almacenar y visualizar datos en la nube a través de ThingSpeak. Se compararon los datos recogidos en mayo con los registros meteorológicos de referencia para evaluar la exactitud, precisión y fiabilidad de los sensores utilizados. En el análisis estadístico se emplearon coeficientes de determinación, coeficientes de correlación de Pearson, error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE) y error porcentual absoluto medio (MAPE). Los resultados evidenciaron que el sensor DHT22 presentó un desempeño superior al DHT11, obteniendo coeficientes de correlación cercanos

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TESIS

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA IOT PARA
EL MONITOREO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EN TEMPERATURA
Y HUMEDAD EN LA CIUDAD DE TACNA – 2026**

PRESENTADA POR:

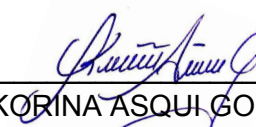
EDWIN ERASMO ANAHUA ORDOÑO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

: 
M.Sc. KORINA ASQUI GOMEZ

PRIMER MIEMBRO

: 
M.Sc. DENILSON MEDINA SANCHEZ

SEGUNDO MIEMBRO

: 
Mtra. NATALY SILVIA GARCIA VILCA

ASESOR DE TESIS

: 
Dra. MARLENE CUSI MONTESINOS

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería Ambiental

Línea de investigación: Ciencias Ambientales

Puno, 17 de julio del 2026.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi esposa, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante cada etapa de mi formación profesional. Su confianza y aliento constante fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis queridas hijas, quienes son mi mayor inspiración y motivación para seguir creciendo y superándome cada día. Este logro es también para ustedes, con todo mi amor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta importante etapa académica. Su guía y bendición me permitieron superar los desafíos presentados durante el desarrollo de esta investigación.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, familiares, esposa e hijas por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación a lo largo de mi formación profesional. Su confianza y esfuerzo han sido fundamentales para alcanzar cada una de mis metas.

Asimismo, agradezco a los docentes de la Escuela Profesional por los conocimientos compartidos, la orientación brindada y el compromiso demostrado durante mi proceso de aprendizaje. De manera especial, reconozco el apoyo de mi asesor de tesis por sus valiosas observaciones, recomendaciones y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo del presente trabajo de investigación, permitiendo fortalecer mis conocimientos y consolidar mi formación profesional.

A todos ellos, mi más profunda gratitud

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	17
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	18
1.2. ANTECEDENTES	18
1.2.1. A NIVEL INTERNACIONAL	18
1.2.2. A NIVEL NACIONAL	23
1.2.3. A NIVEL REGIONAL	26
1.3. OBJETIVOS	29
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	29
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	30
2.1.1. TECNOLOGÍA IOT	30
	3

2.1.2. APLICACIÓN DEL IOT EN EL MONITOREO AMBIENTAL	31
2.1.3. ARQUITECTURA IOT PARA MONITOREO AMBIENTAL	31
2.1.4. INFLUENCIA DE VARIABLES METEOROLÓGICAS	31
2.1.5. MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIANTE IOT	31
2.1.6. NORMATIVA AMBIENTAL SOBRE CALIDAD DEL AIRE EN EL PERÚ	32
2.1.7. VIABILIDAD TÉCNICA DE SISTEMAS IOT	32
2.2. MARCO CONCEPTUAL	32
2.2.1. SENSOR DHT22	32
2.2.2. SENSOR DHT11	33
2.2.3. PLACA ESP32	33
2.2.4. PANEL SOLAR	33
2.2.5. ESTACIÓN METEOROLÓGICA	33
2.2.6. INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	34
2.2.7. PLATAFORMA IOT	34
2.2.8. CORRIENTE ALTERNA (CA)	34
2.2.9. CORRIENTE CONTINUA (CC)	34
2.2.10. TEMPERATURA AMBIENTAL	35
2.2.11. HUMEDAD RELATIVA	35
2.2.12. SENSORES AMBIENTALES EN IOT	35
2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO	35
2.3.1. LEY N.º 28611 – LEY GENERAL DEL AMBIENTE	35
2.3.2. LEY N.º 30754 – LEY MARCO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO	36
2.3.3. LEY N.º 27336 – LEY DE DESARROLLO DE LAS FUNCIONES Y FACULTADES DEL OSIPTEL	36
2.3.4. ISO 9001:2015 – SISTEMAS DE GESTIÓN DE CALIDAD	36
2.3.5. ISO/IEC 30141:2018 – ARQUITECTURA DE IOT	36
2.3.6. DECRETO SUPREMO N.º 010-2019-MINAM – PROTOCOLO NACIONAL DE MONITOREO DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE	37

2.3.7. DECRETO SUPREMO N.° 027-2021-MINAM – REGLAMENTO DEL SENAMHI	37
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	37
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	37
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	37
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. ZONA DE ESTUDIO	39
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	41
3.2.1. POBLACIÓN	41
3.2.2. MUESTRA	41
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS	41
3.3.1. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.3.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.3.3. DISEÑO METODOLÓGICO	42
3.3.4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO Y LA TÉCNICA	42
3.4. DISEÑO METODOLÓGICO POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS	53
3.4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 01	53
3.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 02	57
3.4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 03	58
3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	59
3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	60
3.7. DISEÑO ESTADÍSTICO	60
CAPÍTULO IV	
EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
4.1. DATA DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL SENAMHI	62
4.2. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 01	62
4.2.1. DESCRIPCIÓN DE MONITOREO	63

4.2.2. GRÁFICOS ESTADÍSTICOS	63
4.2.3. INTERPRETACIÓN TÉCNICA	83
4.3. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 02	87
4.3.1. OBSERVACIÓN DE RESULTADOS EN THINGSPEAK	87
4.3.2. CONTINUIDAD ININTERRUMPIDA EN CANAL	89
4.4. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 03	90
4.4.1. INSTRUMENTO PROPUESTO	90
4.4.2. ALTERNATIVAS	91
4.4.3. ELECCIÓN VIABLE	92
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Criterio técnico base para la calibración de equipos de muestreo activo	44
Tabla 02: Identificación de variables del estudio	59
Tabla 03: Operacionalización de variables	60
Tabla 04: Medidas de tendencia central de los valores de temperatura en sensor DHT22	63
Tabla 05: Medidas de dispersión de los valores de temperatura en sensor DHT22	63
Tabla 06: Cuantiles y comportamiento de los valores de temperatura en sensor DHT22	63
Tabla 07: Medidas de tendencia central de los valores de humedad en sensor DHT22	65
Tabla 08: Medidas de dispersión de los valores de humedad en sensor DHT22	65
Tabla 09: Cuantiles y comportamiento de los valores de humedad en sensor DHT22	65
Tabla 10: Medidas de tendencia central de los valores de temperatura en sensor DHT11	67
Tabla 11: Medidas de dispersión de los valores de temperatura en sensor DHT11	67
Tabla 12: Cuantiles y comportamiento de los valores de temperatura en sensor DHT11	67
Tabla 13: Medidas de tendencia central de los valores de humedad en sensor DHT11	69
Tabla 14: Medidas de dispersión de los valores de humedad en sensor DHT11	69
Tabla 15: Cuantiles y comportamiento de los valores de humedad en sensor DHT11	69
Tabla 16: Resultados de validación en temperatura máxima con sensor DHT22	71
Tabla 17: Resultados de validación en temperatura mínima con sensor DHT22	73
Tabla 18: Resultados de validación en temperatura mínima con sensor DHT11	75
Tabla 19: Resultados de validación en temperatura mínima con sensor DHT11	77
Tabla 20: Resultados de validación en humedad relativa con sensor DHT22	79
Tabla 21: Resultados de validación en humedad relativa con sensor DHT11	81
Tabla 22: Especificaciones técnicas de panel solar propuesto	91

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Mapa de ubicación de estación meteorológica UNJBG	40
Figura 02: Imagen satelital de estación meteorológica UNJBG	40
Figura 03: Frentera de área de la estación meteorológica del SENAMHI	54
Figura 04: Módulo de ESP32 utilizado en el estudio	54
Figura 05: Sensor DHT 22 con terminales de comunicación	55
Figura 06: Estación meteorológica Davis	55
Figura 07: Laptop para visualización remota de lectura de datos por sensor DHT22	56
Figura 08: Portada de plataforma ThingSpeak para visualización de data cruda en campo	56
Figura 09: Gráfico de evolución de temperaturas máximas y mínimas diarias en el mes de mayo registradas con sensor DHT22	64
Figura 10: Gráfico de evolución de máximas y mínimas diarias de humedad en el mes de mayo registradas con sensor DHT22	66
Figura 11: Gráfico de evolución de máximas y mínimas diarias de temperatura en el mes de mayo registradas con sensor DHT11	68
Figura 12: Gráfico de evolución de máximas y mínimas diarias de humedad en el mes de mayo registradas con sensor DHT11	70
Figura 13: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT22 vs SENAMHI	71
Figura 14: Gráfico comparativo de valores máximos entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 22	72
Figura 15: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT22 vs SENAMHI	73
Figura 16: Gráfico comparativo de valores mínimos entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 22	74
Figura 17: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT11 vs SENAMHI	75
Figura 18: Gráfico comparativo de valores máximos de temperatura entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 11	76
	8

Figura 19: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT11 vs SENAMHI	77
Figura 20: Gráfico comparativo de valores mínimos de temperatura entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 11	78
Figura 21: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT22 vs SENAMHI	79
Figura 22: Gráfico comparativo de valores de humedad relativo entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 22	80
Figura 23: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT11 vs SENAMHI	81
Figura 24: Gráfico comparativo de valores de humedad relativa entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 11	82
Figura 25: Campo de conformidad de lectura y recepción de data del sensor DHT22 y DHT11	90
Figura 26: Imagen referencial de conexión entre placa y sensor con módem de conexión permanente	93
Figura 27: Cartel de Estación Meteorológica del SENAMHI – UNJBG.	107
Figura 28: Entrada de Estación Meteorológica del SENAMHI – UNJBG.	107
Figura 29: Estuche protector de placa ESP32.	108
Figura 30: Reconocimiento de WiFi de la placa ESP32.	108
Figura 31: Reconocimiento de conexión eléctrica con panel solar ordinario.	109
Figura 32: Reconocimiento de encendido de luz roja de la placa ESP32.	109
Figura 33: Reconocimiento de conexión eléctrica con panel solar ordinario.	110
Figura 34: Placa ESP32 y sensor de temperatura y humedad.	110

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia	105
Anexo 02: Panel fotográfico	107
Anexo 03: Plataforma ThingSpeak en funcionamiento	111

RESUMEN

La presente investigación tiene por objeto examinar la factibilidad técnica de utilizar tecnología IoT para monitorear al mismo tiempo la humedad y la temperatura en Tacna. La investigación surge de la necesidad de tener opciones tecnológicas asequibles que posibiliten el complemento de los sistemas tradicionales de monitoreo meteorológico, mediante la obtención, comunicación y visualización remota de datos en tiempo real. Se aplicó una metodología de enfoque cuantitativo, con un nivel aplicado y un diseño no experimental que es descriptivo-correlacional. Se creó un sistema de Internet de las Cosas (IoT) que emplea una placa ESP32 con conectividad WiFi, los sensores DHT22 y DHT11, así como una plataforma para almacenar y visualizar datos en la nube a través de ThingSpeak. Se compararon los datos recogidos en mayo con los registros meteorológicos de referencia para evaluar la exactitud, precisión y fiabilidad de los sensores utilizados. En el análisis estadístico se emplearon coeficientes de determinación, coeficientes de correlación de Pearson, error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE) y error porcentual absoluto medio (MAPE). Los resultados evidenciaron que el sensor DHT22 presentó un desempeño superior al DHT11, obteniendo coeficientes de correlación cercanos a la unidad y errores mínimos tanto para temperatura como para humedad relativa. Asimismo, pudo verificar la transmisión continua e ininterrumpida de los datos durante todo el periodo de monitoreo mediante una conexión eléctrica de 5V de corriente continua. Se determinó que el uso de tecnología IoT es una opción técnica factible para monitorear en tiempo real la temperatura y la humedad. Se destacó el sensor DHT22 como la alternativa más conveniente por su alta precisión, exactitud y confiabilidad.

Palabras clave: Humedad, Internet de las Cosas, Monitoreo meteorológico, Temperatura, ThingSpeak.

ABSTRACT

The purpose of this research was to examine the technical feasibility of using IoT technology to simultaneously monitor humidity and temperature in Tacna. The study arose from the need for affordable technological alternatives capable of complementing traditional meteorological monitoring systems through remote data acquisition, communication, and real-time data visualization. A quantitative approach was employed, with an applied research level and a non-experimental, descriptive-correlational design. An Internet of Things (IoT) system was developed using an ESP32 board with WiFi connectivity, DHT22 and DHT11 sensors, and a cloud-based platform for data storage and visualization through ThingSpeak. The data collected during May were compared with reference meteorological records to assess the accuracy, precision, and reliability of the sensors. Statistical analysis included coefficients of determination, Pearson correlation coefficients, root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean absolute percentage error (MAPE). The results showed that the DHT22 sensor outperformed the DHT11, achieving correlation coefficients close to unity and minimal errors for both temperature and relative humidity measurements. In addition, continuous and uninterrupted data transmission was verified throughout the monitoring period using a 5V direct current power supply. It was determined that the use of IoT technology is a technically feasible option for real-time monitoring of temperature and humidity. The DHT22 sensor was identified as the most suitable alternative due to its high precision, accuracy, and reliability.

Keywords: Humidity, Internet of Things, Weather monitoring, Temperature, ThingSpeak.

INTRODUCCIÓN

La supervisión de variables meteorológicas es una tarea esencial para entender los procesos de la atmósfera y para decidir en diferentes áreas que tienen que ver con la gestión del medio ambiente, la agricultura, el planeamiento urbano y la prevención de riesgos. La humedad relativa y la temperatura son dos de los parámetros más relevantes, ya que afectan directamente las condiciones climáticas locales y una variedad de procesos ambientales que tienen un impacto en la calidad de vida de los habitantes. En Tacna, ciudad con un clima árido y altas radiaciones solares, donde las temperaturas fluctúan considerablemente de un día para otro, es esencial contar con datos meteorológicos fiables para evaluar el estado del medio ambiente y el clima.

Recientemente, gracias al Internet de las cosas (IoT), se han desarrollado sistemas para monitorear el medioambiente que son asequibles y que pueden recoger, traspasar y guardar información en tiempo real utilizando plataformas digitales, sensores electrónicos y microcontroladores. La posibilidad de obtener datos de manera continua con costos más bajos de puesta en marcha y mantenimiento ha sido probada por estas tecnologías, las cuales tienen un gran potencial para complementar a las estaciones meteorológicas tradicionales.

Diversas investigaciones desarrolladas a nivel internacional, nacional y regional han demostrado que los sistemas basados en tecnología IoT pueden constituir alternativas viables para el monitoreo ambiental y meteorológico. Los resultados obtenidos en dichas investigaciones evidencian que la utilización de sensores de bajo costo, adecuadamente configurados y validados, permite obtener información comparable a la registrada por estaciones meteorológicas tradicionales, favoreciendo el acceso a herramientas de monitoreo en tiempo real para diferentes aplicaciones ambientales.

En este marco, el objetivo de la investigación actual fue determinar si es factible desde un punto de vista técnico emplear tecnología IoT para supervisar en tiempo real la humedad y la temperatura en Tacna. Se diseñó y utilizó un sistema que emplea una placa ESP32, los sensores DHT22 y DHT11 y ThingSpeak como plataforma para almacenar y visualizar

datos. Este sistema posibilita la obtención automática de información meteorológica así como su transmisión inalámbrica en tiempo real.

La investigación se orientó a determinar la precisión y exactitud de los sensores utilizados mediante la comparación de sus registros con datos meteorológicos de referencia, analizar la estabilidad de la conexión inalámbrica empleada para la transmisión de información y verificar la continuidad del sistema de alimentación eléctrica durante toda la campaña de monitoreo. De esta manera, se buscó establecer si la tecnología IoT puede constituir una alternativa técnicamente confiable para el monitoreo meteorológico en las condiciones ambientales propias de la región Tacna.

La tesis está dividida en cuatro capítulos. El Capítulo I expone el planteamiento del problema, los antecedentes y las metas que persigue la investigación. El marco teórico, conceptual y normativo, además de las hipótesis formuladas, se desarrollan en el Capítulo II. El Capítulo III explica el método que se empleó, abarcando la zona de estudio, el diseño metodológico, la puesta en marcha del sistema IoT y cómo se procesaron estadísticamente los datos. Por último, el capítulo IV presenta y examina los resultados obtenidos, lo que posibilita la formulación de las conclusiones y sugerencias derivadas del estudio.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El monitoreo de los parámetros meteorológicos constituye una actividad fundamental para la gestión del riesgo de desastres, la agricultura, la investigación científica y la planificación de actividades económicas, debido a que proporciona información confiable sobre el comportamiento de la atmósfera y permite comprender la variabilidad del clima. En los últimos años, el incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos ha evidenciado la necesidad de fortalecer los sistemas de observación para disponer de información continua, precisa y oportuna que facilite la toma de decisiones. En este contexto, la Organización Meteorológica Mundial destaca que la disponibilidad de redes de observación de calidad constituye un componente esencial para el desarrollo de servicios meteorológicos y climáticos eficaces (World Meteorological Organization [WMO], 2023).

Paralelamente, el acelerado desarrollo del Internet de las Cosas (IoT) ha permitido el diseño de sistemas de monitoreo ambiental capaces de adquirir, transmitir y visualizar información en tiempo real mediante dispositivos de bajo costo y bajo consumo energético. Estas tecnologías han ampliado las posibilidades de implementar redes de sensores distribuidos que complementan los sistemas tradicionales de monitoreo, favoreciendo la obtención de información con mayor cobertura espacial y temporal. La Unión Internacional de Telecomunicaciones reconoce que el IoT constituye una de las principales tecnologías impulsoras de la transformación digital, debido a su capacidad

para conectar dispositivos físicos y generar información útil para diversos sectores, entre ellos el monitoreo ambiental y meteorológico (International Telecommunication Union [ITU], 2023).

A nivel internacional, diversas investigaciones han demostrado la viabilidad del empleo de plataformas IoT para el monitoreo de variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación. El uso de microcontroladores como ESP32 y sensores digitales de bajo costo ha permitido desarrollar estaciones meteorológicas capaces de transmitir información en tiempo real hacia plataformas en la nube, obteniendo resultados con niveles aceptables de precisión respecto a equipos convencionales cuando son adecuadamente calibrados. Estas investigaciones evidencian que la tecnología IoT representa una alternativa técnicamente viable para ampliar la cobertura del monitoreo meteorológico, especialmente en zonas donde la instalación de estaciones automáticas convencionales resulta económicamente limitada (Kodali & Sahu, 2016; Yilmaz et al., 2022).

En América Latina, la incorporación de tecnologías IoT al monitoreo meteorológico aún presenta un desarrollo desigual entre los distintos países. Aunque se han incrementado las investigaciones orientadas al diseño de estaciones meteorológicas inteligentes de bajo costo, la mayoría corresponde a proyectos académicos o aplicaciones experimentales, existiendo todavía limitadas evaluaciones sobre su desempeño técnico en condiciones ambientales reales. Esta situación restringe la disponibilidad de evidencia científica que permita respaldar su implementación como complemento de las redes meteorológicas convencionales (World Meteorological Organization, 2023).

En el Perú, el monitoreo meteorológico es desarrollado principalmente por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), institución responsable de operar la red nacional de estaciones meteorológicas e hidrológicas para generar información oficial sobre el estado del tiempo y del clima. No obstante, debido a las características geográficas del territorio nacional y a las limitaciones asociadas a los costos de instalación, operación y mantenimiento de estaciones automáticas convencionales,

continúa existiendo la necesidad de fortalecer la densidad espacial del monitoreo mediante tecnologías complementarias que permitan ampliar la disponibilidad de información meteorológica en tiempo real (SENAMHI, 2023; WMO, 2023).

En la región de Tacna, el registro continuo de parámetros como temperatura y humedad relativa resulta indispensable para actividades relacionadas con la gestión ambiental, la agricultura, la investigación científica y la evaluación de las condiciones climáticas propias de una zona caracterizada por un clima predominantemente árido y una elevada variabilidad térmica diaria. Sin embargo, la implementación de soluciones tecnológicas de bajo costo que permitan complementar el monitoreo convencional aún requiere demostrar que sus mediciones presentan niveles adecuados de precisión, estabilidad y confiabilidad frente a los equipos de referencia utilizados por el SENAMHI. En consecuencia, persiste la necesidad de generar evidencia técnica que permita determinar si los sistemas basados en tecnología IoT pueden constituir una alternativa válida para el monitoreo meteorológico bajo las condiciones ambientales de Tacna.

En ese contexto, la presente investigación se orientó a evaluar la viabilidad técnica de un sistema basado en tecnología IoT para el monitoreo de temperatura y humedad relativa mediante una plataforma desarrollada con microcontrolador ESP32 y sensor DHT22, comparando su desempeño con los registros proporcionados por una estación meteorológica del SENAMHI. Los resultados obtenidos permitirán determinar si esta tecnología presenta niveles adecuados de precisión, confiabilidad y estabilidad para complementar los sistemas tradicionales de monitoreo meteorológico y contribuir al desarrollo de soluciones de bajo costo para la adquisición de información ambiental en tiempo real.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿En qué medida es técnicamente viable la implementación de la tecnología IoT para el monitoreo en tiempo real de los parámetros meteorológicos de temperatura y humedad en la ciudad de Tacna - 2026?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Qué tan precisos y exactos son los sensores IoT seleccionados para medir la temperatura y humedad en comparación con los instrumentos tradicionales?
- ¿Cuál es el alcance y la estabilidad de la conexión inalámbrica para enviar los datos meteorológicos desde el lugar de medición hasta la plataforma web?
- ¿De qué manera el sistema de alimentación eléctrica propuesto es capaz de mantener el equipo IoT funcionando de forma continua y sin interrupciones?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. A NIVEL INTERNACIONAL

Melo et al. (2021), en su investigación titulada “*A low-cost IoT system for real-time monitoring of climatic variables and photovoltaic generation for smart grid application*”, desarrollada en la Federal University of Alagoas y publicada en la revista *Sensors*, propusieron el sistema IoT para el monitoreo de variables climáticas y generación fotovoltaica. Se tuvo que diseñar una solución de bajo costo capaz de medir de manera continua parámetros ambientales como la temperatura, la humedad y la radiación solar mediante sensores integrados a microcontroladores con conectividad inalámbrica. La metodología de carácter experimental se basó en el despliegue de un prototipo funcional que permitía la transmisión inalámbrica de datos enviados y el almacenamiento local como respaldo ante fallas de red. Los resultados técnicos del estudio destacaron que el sistema implementó con éxito para lograr la sincronización exacta de los relojes de los dispositivos periféricos, garantizando marcas de tiempo precisas para cada lectura climática; asimismo, la captura de datos energéticos se realizó directamente desde la planta y no a través del inversor, eliminando distorsiones en las métricas registradas. Por ello, se concluye que la arquitectura basada en IoT representa una alternativa técnicamente viable frente a las tecnologías tradicionales, ya que el uso de software abierto y hardware accesible descentraliza el monitoreo meteorológico continuo sin incurrir en los altos costos de adquisición y licenciamiento de los equipos comerciales cerrados, lo que otorga un respaldo directo a la viabilidad de la presente investigación.

Romero y Orduz (2022), en su artículo titulado *“Implementación de un sistema IoT de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en El Salvador”*, evaluaron la aplicación de tecnologías IoT para el diseño y despliegue de una estación remota de monitoreo ambiental. El objetivo de la investigación fue desarrollar un prototipo accesible que permitiera registrar parámetros de contaminación por material particulado y consultar la información desde cualquier dispositivo con conexión a internet. La metodología se estructuró bajo el Modelo de Referencia de Arquitectura para sistemas IoT, empleando hardware de código abierto compuesto por el microcontrolador ESP32 y la placa Wemos-Lolin, integrados a un sensor láser de partículas PMS5003, además de una etapa de almacenamiento y verificación. Los resultados técnicos demostraron la estabilidad del prototipo para procesar, transmitir y graficar los datos climáticos y ambientales en entornos con limitaciones de infraestructura cableada, operando de forma autónoma mediante redes inalámbricas. Partiendo de los resultados, se concluye que la implementación de nodos sensores basados en tecnologías IoT de bajo costo es viable y eficiente para expandir la cobertura de monitoreo ambiental en zonas críticas o con nulo acceso a estaciones meteorológicas oficiales, ya que optimiza el flujo de información en tiempo real sin las restricciones geográficas ni los altos costos de los sistemas tradicionales, sirviendo como base operativa para la evaluación de viabilidad de la presente tesis.

Iglesias (2025), en su tesis titulada *“Design and Implementation of an IoT Weather Station”*, desarrollada en la Novia University of Applied Sciences de Vaasa, Finlandia”, evaluó el diseño, la implementación y la validación de una estación meteorológica automatizada basada en la tecnología IoT. Se evaluó la viabilidad técnica de un prototipo autónomo de bajo costo capaz de registrar parámetros ambientales de manera constante, manteniendo un consumo energético reducido y una transmisión confiable. Para ello, se empleó una metodología de carácter experimental basada en la integración de un microcontrolador con el sensor FS400-SHT3X para medir la temperatura, humedad relativa y el módulo BMP180 para el monitoreo de la presión atmosférica. El dispositivo se

instaló en el exterior de las instalaciones universitarias y los datos se enviaron hacia un servidor. Los resultados de las pruebas operativas demostraron un funcionamiento estable y continuo en la captura de datos; asimismo, la validación técnica mediante la comparación directa de las lecturas del prototipo frente a los registros oficiales del Instituto Meteorológico de Finlandia confirmó que las desviaciones y márgenes de error fueron mínimos, validando la calibración y precisión de los sensores de bajo costo utilizados. Sobre la base de estos resultados, se concluye que las estaciones meteorológicas basadas en IoT son técnicamente viables y confiables como herramientas complementarias para las redes convencionales de monitoreo ambiental, permitiendo ampliar la cobertura de datos en microclimas específicos, lo cual aporta un antecedente metodológico directo para la evaluación de viabilidad de la presente investigación.

Shrestha (2025), en su tesis titulada “*Smart, Portable IoT Weather Station with Seismic Activity Detection*”, desarrollada en la Centria University of Applied Sciences”, de Finlandia, abordó el diseño y la validación de un sistema inteligente para medir las variables meteorológicas y geofísicas. La investigación tuvo como objetivo evaluar su viabilidad técnica para la captura continua de parámetros atmosféricos en regiones de clima extremo. Para ello, se desarrolló un prototipo utilizando el microcontrolador Raspberry Pi Pico W junto con el sensor DHT22 para medir la temperatura y la humedad relativa, y el sensor BMP280 para registrar la presión atmosférica y estimar la altitud; los datos recolectados eran procesados localmente y enviados de forma inalámbrica al servidor en línea. Los resultados experimentales demostraron que la arquitectura electrónica mantuvo un funcionamiento estable y sin interrupciones operativas incluso bajo las bajas temperaturas del invierno nórdico, destacando el desempeño del sensor BMP280 por la linealidad y estabilidad de sus lecturas de presión durante todo el periodo de evaluación. Por lo tanto, se concluye que las soluciones IoT basadas en hardware libre y componentes de bajo consumo energético constituyen una alternativa técnicamente viable y mecánicamente resiliente para el monitoreo autónomo de variables meteorológicas en entornos climáticos severos, lo que demuestra su adaptabilidad

geográfica y respalda la viabilidad del despliegue tecnológico planteado en la presente investigación.

Nguyen (2021), en su proyecto de titulación titulado “*Smart Weather Station*”, desarrollado en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Vaasa, Finlandia, diseñó e implementó una estación meteorológica basada en tecnología IoT con la finalidad de recopilar y transmitir información climática de manera automática. La investigación estuvo orientada al desarrollo de un prototipo de bajo costo capaz de registrar variables atmosféricas y enviar los datos de forma inalámbrica, reduciendo la dependencia de infraestructuras cableadas complejas. Para ello, se empleó el microcontrolador de arquitectura abierta ESP8266 (NodeMCU) junto con sensores de la serie DHT para la medición de la temperatura y la humedad ambiental, implementando la comunicación de datos mediante el modelo de protocolos TCP/IP hacia un servidor remoto. Se demostró un funcionamiento estable en los ciclos de captura, el procesamiento local y la transferencia inalámbrica de la información, permitiendo el almacenamiento estructurado de los registros climáticos y su consulta remota inmediata a través de una interfaz gráfica web. Así se concluye que el uso de microcontroladores con conectividad Wi-Fi integrada y sensores de bajo costo constituye una alternativa técnicamente viable y eficiente para automatizar el monitoreo meteorológico, ya que la pila de protocolos TCP/IP garantiza la integridad de los paquetes de datos ambientales transmitidos de forma continua sin saturar el canal de comunicación, validando así los criterios de conectividad inalámbrica analizados en la presente investigación.

Ciza (2022), en su tesis de maestría titulada “*IoT Based System for Monitoring and Control Data Center Temperature*”, desarrollada en la Nelson Mandela African Institution of Science and Technology (NM-AIST) de Tanzania, evaluó el diseño y rendimiento de un sistema basado en tecnología IoT para el monitoreo automatizado de variables ambientales críticas. La investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia técnica, estabilidad y disponibilidad de una red de sensores destinada a la recolección y almacenamiento remoto de datos de temperatura y humedad en entornos de supervisión

constante. Para ello, se implementó una metodología tecnológica con enfoque cuantitativo basada en el uso de sensores digitales conectados a un procesador central encargado de captar, procesar y transmitir la información de manera continua hacia plataformas, permitiendo la generación de alertas automáticas y chequeo. Los resultados de las pruebas evidenciaron una disponibilidad operativa del 99.1% en el flujo de datos, garantizando un monitoreo ininterrumpido y reduciendo significativamente la necesidad de inspecciones manuales o registros manuales en el área de estudio. A partir de estos hallazgos, se concluye que las soluciones basadas en IoT constituyen una alternativa técnicamente viable, confiable y altamente escalable para el monitoreo de variables ambientales, puesto que ese nivel de disponibilidad operativa superior al 99% demuestra que el hardware de bajo costo posee la resiliencia necesaria para el registro continuo y preciso de datos, ofreciendo un sólido respaldo técnico a los criterios de estabilidad evaluados en la presente investigación.

De la Cruz (2024), en su proyecto de titulación titulado *“Desarrollo de una red de sensores distribuida IOT para sistema meteorológico”*, desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, presentó el diseño y la validación de una infraestructura inalámbrica basada en el Internet de las Cosas para capturar y difundir variables ambientales en tiempo real. El objetivo del estudio fue evaluar la viabilidad de una red de nodos de bajo costo capaz de medir con precisión parámetros de temperatura, humedad y presión atmosférica local, integrando además un enfoque preventivo mediante un indicador de radiación ultravioleta. Se utilizó una metodología de diseño tecnológico experimental en la que varios módulos periféricos se conectaron de forma inalámbrica a un nodo central, automatizando el procesamiento de datos, el almacenamiento de históricos y la visualización remota en plataformas web. Los resultados técnicos demostraron que la red operó de forma estable en la transmisión continua de datos, logrando un tiempo de respuesta de apenas dos segundos en el enlace inalámbrico y garantizando un flujo constante de información sin pérdida de paquetes. Sobre la base de estos resultados, se concluye que las redes meteorológicas

basadas en IoT constituyen una alternativa robusta, escalable y económica para descentralizar el acceso a datos climáticos precisos, ya que la baja latencia en la transmisión demuestra la viabilidad técnica de los enlaces inalámbricos de bajo costo frente a las costosas restricciones de los sistemas comerciales cerrados, aportando un sustento de conectividad directo para la presente investigación.

1.2.2. A NIVEL NACIONAL

Ramírez (2023), en su tesis titulada *“Diseño de un sistema de monitoreo IoT para mejorar la productividad del agricultor en el poblado de Cuchuchin-Sayan, 2023”*, desarrollada en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión de Huacho, Perú, evaluó el sistema IoT enfocado a la toma de decisiones mediante el monitoreo automatizado de variables ambientales. Se buscó determinar la correlación entre el monitoreo IoT y la productividad de los productores locales. Se aplicó metodología de carácter descriptivo y correlacional, cuantitativo, aplicando herramientas de recolección de datos directamente a los actores del sector para medir el impacto de la tecnología propuesta. Los resultados técnicos demostraron que la arquitectura del sistema, diseñada y programada para conectarse de forma inalámbrica a una plataforma digital, permitió la visualización remota y en tiempo real de los parámetros ambientales, registrando un coeficiente de correlación estadísticamente alto que evidenció una alta correlación entre el sistema IoT y la optimización operativa. Por lo tanto, se concluye que los sistemas IoT son técnicamente viables y funcionales para entornos rurales, debido a que la automatización del registro de variables atmosféricas elimina la incertidumbre en la captura de datos y agiliza el procesamiento de información climática local, lo cual respalda metodológicamente la evaluación de viabilidad técnica planteada en la presente investigación.

Ricaldi (2023), en su proyecto de investigación titulado *“Implementación de una estación meteorológica aplicando IOT en los Humedales de Ventanilla – Callao”*, desarrollado en la Universidad de Ciencias y Humanidades, evaluó el despliegue de una plataforma tecnológica de bajo costo basada en el Internet de las Cosas (IoT) para medir variables ambientales de forma autónoma en ecosistemas vulnerables. El objetivo principal de la

investigación fue desarrollar una alternativa económica para el registro del clima local mediante una metodología de investigación aplicada con un diseño tecnológico. El sistema integró un microcontrolador de arquitectura abierta y sensores digitales encargados de capturar la temperatura y la humedad ambiental, programando el procesador para recopilar las lecturas y transmitir las mediante redes Wi-Fi hacia el servidor en la nube de libre acceso ThingSpeak. Los resultados de las pruebas de campo demostraron que el sistema funcionó con precisión operativa y mantuvo una transmisión constante de los parámetros climáticos hacia la interfaz web sin registrar interrupciones críticas en los ciclos de envío. En virtud de estos resultados, queda demostrado que el empleo de hardware libre y plataformas IoT en la nube representa una solución técnica viable y económicamente sostenible para modernizar el monitoreo ambiental, ya que la estabilidad de las redes inalámbricas y el uso de servidores de acceso abierto permiten consolidar bases de datos en tiempo real sin depender de costosas infraestructuras comerciales cerradas, lo que valida los criterios de viabilidad económica y técnica analizados en la presente tesis.

Pinares (2025), en su tesis titulada *“Implementación de un Sistema de Monitoreo Ambiental en Tiempo Real con ESP32 y Evaluación Comparativa de Middlewares para la Gestión de Dispositivos IoT en Instituciones Educativas”*, desarrollada en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, evaluó el diseño y despliegue de una plataforma tecnológica para la supervisión de variables físicas en entornos cerrados. El objetivo de la investigación fue mejorar las condiciones meteorológicas dentro de las aulas mediante la medición continua de parámetros como la temperatura, la iluminancia y el ruido. Así, se aplicó una metodología de diseño experimental donde se emplearon sensores digitales integrados al microcontrolador ESP32 para la adquisición de datos, los cuales eran transmitidos mediante redes Wi-Fi y almacenados de forma estructurada en una plataforma en la nube para su posterior análisis. Los resultados experimentales demostraron que el prototipo operó con una precisión adecuada, registrando desviaciones máximas que se mantuvieron estrictamente dentro de los márgenes de

tolerancia técnica aceptables al compararse con un instrumento de calibración profesional de referencia. Partiendo de los datos analizados, se establece que el uso de microcontroladores de alta velocidad como el ESP32 es técnicamente viable y confiable para el monitoreo ambiental continuo, ya que la estabilidad de su arquitectura permite procesar múltiples señales de sensores en tiempo real y garantizar la fidelidad de los datos transmitidos, sirviendo como un respaldo metodológico directo para la evaluación de sensores planteada en la presente investigación.

Salgado et al. (2025), en su artículo titulado *“Desarrollo de una estación IoT para monitoreo de microclimas y condiciones de suelo para adaptación de cultivos al cambio climático”*, publicado en la revista *INGENIERÍA INVESTIGA* de la Universidad Privada de Tacna, presentaron el diseño de una infraestructura basada en el IoT para la supervisión ambiental. Se buscó determinar la viabilidad técnica de integrar múltiples sensores atmosféricos de precisión dentro de una sola estación descentralizada para el registro automático de microclimas. La metodología contempló el despliegue de nodos centrales ESP32 acoplados a módulos de radiofrecuencia (RF) y nodos secundarios NodeMCU-32 equipados con sensores BME280 para medir la temperatura, la humedad y la presión atmosférica, complementados con sensores de radiación ultravioleta y velocidad del viento, cuyos datos se enviaron a la plataforma ThingSpeak para su visualización web. Los resultados analíticos indicaron que la plataforma recolectó las variables con altos niveles de precisión y fiabilidad, mostrando una concordancia estadística significativa en las lecturas al ser contrastadas con los registros de un equipo normado de referencia. Entonces, se concluyó que la integración de tecnologías IoT y el uso de sensores combinados como el BME280 constituyen una solución técnicamente viable y robusta para el monitoreo meteorológico, dado que su arquitectura electrónica permite centralizar el procesamiento de múltiples variables atmosféricas de forma simultánea, garantizando la fidelidad de los datos sin los costos de las estaciones comerciales, lo que provee un respaldo empírico e institucional directo a la viabilidad de la presente tesis.

Julca y Olivera (2023), en su tesis titulada *“Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica con tecnología Arduino para la Universidad Nacional de Jaén”*, desarrollada en la Universidad Nacional de Jaén, evaluaron el diseño y la puesta en marcha de un sistema de bajo costo para el control automatizado de variables atmosféricas en entornos con acceso limitado a equipos comerciales. El objetivo de la investigación fue desarrollar y evaluar un prototipo electrónico para el registro continuo de datos climáticos mediante una metodología de diseño experimental aplicado. El sistema se estructuró en cuatro etapas operativas: el desarrollo del circuito electrónico integrando sensores BME280 para registrar temperatura, humedad y presión atmosférica; la programación en código C++ sobre una tarjeta Arduino Mega 2560 con almacenamiento local en tarjetas microSD; la implementación de un sistema de alimentación solar autónomo mediante paneles de 20 vatios; y el diseño de una carcasa protectora mediante impresión tridimensional. Los resultados analíticos demostraron que el prototipo alcanzó niveles de precisión comparables con las estaciones comerciales homologadas de la marca MACCARD, un rendimiento respaldado además por una evaluación financiera favorable que registró un Valor Actual Neto de S/ 7,391.00 y una Tasa Interna de Retorno del 44.28%. Por lo tanto, se concluye que el diseño de estaciones meteorológicas basadas en tecnologías abiertas es técnica y económicamente viable, dado que el uso del sensor BME280 garantiza la exactitud en la captura de las variables atmosféricas fundamentales, mientras que los indicadores financieros demuestran que el proyecto es sostenible y rentable para sustituir tecnologías comerciales cerradas, aportando un sólido respaldo de costo-beneficio para la presente investigación.

1.2.3. A NIVEL REGIONAL

Mamani (2024), en su tesis titulada *“Sistema de monitoreo en IoT para medir la contaminación en el lago Titicaca, Puno 2023”*, desarrollada en la Universidad Nacional del Altiplano, evaluó el desarrollo de una plataforma tecnológica orientada a supervisar parámetros ambientales en cuerpos de agua expuestos a perturbaciones ecológicas. El objetivo de la investigación fue construir un sistema basado IoT para registrar y evaluar

de forma automatizada los niveles de contaminación y las condiciones climáticas del entorno local. La investigación fue de enfoque cuantitativo y diseño correlacional, ejecutando campañas de muestreo tres veces al día en diferentes franjas horarias para capturar las variaciones de los parámetros físicos, utilizando sensores ambientales conectados a tarjetas de desarrollo compatibles con el entorno Arduino y vinculados a la plataforma en la nube ThingSpeak para la transmisión inalámbrica. Los resultados de las mediciones de campo evidenciaron la capacidad de la red para registrar las condiciones atmosféricas en tiempo real, reportando variaciones térmicas en el aire que oscilaron entre los 17 °C y los 20.56 °C, detectando además la necesidad de someter a los módulos sensores a procesos iniciales de calibración analógica para optimizar sus niveles de precisión. A partir de ello, se concluye que la implementación de arquitecturas IoT representa una alternativa técnicamente viable y funcional para el monitoreo medioambiental continuo, debido a que la combinación de hardware de bajo costo y servidores en la nube permite mapear dinámicas climáticas regionales en tiempo real, siempre que se complemente con una etapa de calibración técnica que mitigue el margen de error de los sensores periféricos, aportando un valioso criterio operativo para la presente investigación.

Huarachi y Calcina (2024), en su proyecto de titulación titulado “*Sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible*”, desarrollado en la Universidad Nacional del Altiplano, evaluaron el despliegue de una red de sensores autónomos basada en el Internet de las Cosas (IoT) para registrar el comportamiento meteorológico bajo condiciones ambientales altiplánicas. El objetivo central de la investigación fue evaluar el desempeño operativo del protocolo inalámbrico LoRaWAN para capturar variables atmosféricas clave como la velocidad del viento, la temperatura y la humedad, validando una alternativa de comunicación de largo alcance que optimice la adquisición de datos climáticos. La metodología aplicada consistió en un diseño tecnológico experimental donde se desplegaron nodos sensores periféricos programados para transmitir la información de

forma inalámbrica hacia una puerta de enlace o *gateway* central, el cual procesaba y redirigía los paquetes informáticos para su visualización remota. Los resultados de las pruebas de campo demostraron que la arquitectura implementada exhibió una notable estabilidad electrónica y una cobertura robusta, soportando las complejidades geográficas y topográficas de la región y garantizando un flujo continuo de reportes climáticos con un margen mínimo de pérdida de paquetes en el enlace de radiofrecuencia. A partir de estos hallazgos, se concluye que la combinación de hardware abierto y redes de modulación LoRaWAN constituye una solución técnica idónea, escalable y económicamente sostenible para el monitoreo microclimático en zonas de gran altitud, ya que la inmunidad al ruido y el extenso radio de cobertura del protocolo demuestran la viabilidad técnica de descentralizar la toma de datos meteorológicos sin depender de costosas redes celulares tradicionales, aportando un sólido respaldo de conectividad inalámbrica para la presente tesis.

Coila (2024), en su tesis titulada *“Diseño de una arquitectura basada en internet de las cosas para la optimización de la calidad del suelo y ambiente de los jardines del distrito de Puno”*, desarrollada en la Universidad Nacional del Altiplano, presentó el desarrollo de una infraestructura tecnológica orientada a la supervisión de parámetros ambientales y edáficos en espacios urbanos. Se trabajó en la implementación de un sistema automatizado para el monitoreo de variables como la temperatura, la humedad ambiental y la presencia de gases. La metodología aplicada se aplicó para el diseño de una arquitectura IoT mixta, utilizando tarjetas Arduino para la lectura e interpretación de las señales analógicas y digitales de los sensores periféricos, vinculadas directamente a un microprocesador Raspberry Pi que actuaba como enrutador y pasarela central para gestionar la conectividad y asegurar la transmisión de los datos hacia un servidor central en internet. Los resultados analíticos demostraron la plena funcionalidad de la arquitectura para sostener la supervisión remota de forma continua, registrando estabilidad en el procesamiento distribuido y un flujo constante de información hacia la interfaz de usuario. A partir de estos hallazgos, se concluye que la combinación de

microcontroladores y microprocesadores en arquitecturas IoT es técnicamente viable y eficiente para el monitoreo atmosférico, ya que la división de tareas entre la adquisición local de señales y el enrutamiento de red optimiza el consumo de recursos de hardware y garantiza la disponibilidad de los datos en tiempo real, aportando un valioso criterio de diseño de sistemas para la presente investigación.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica de la implementación de la tecnología IoT para el monitoreo en tiempo real de los parámetros meteorológicos de temperatura y humedad en la ciudad de Tacna - 2026.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la precisión y exactitud de los sensores IoT seleccionados para la medición de temperatura y humedad mediante la comparación con instrumentos meteorológicos tradicionales.
- Analizar el alcance y la estabilidad de la conexión inalámbrica empleada para la transmisión de los datos meteorológicos desde el punto de captura hasta la plataforma web.
- Verificar la capacidad y continuidad del sistema de alimentación eléctrica propuesto para mantener el equipo IoT operando de forma continua y sin interrupciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1.1. Tecnología IoT

El Internet de las Cosas (IoT) es una tecnología que posibilita la conexión entre hardwares a través de redes de comunicación, lo cual simplifica la recolección, envío y procesamiento de data in situ por medio de plataformas digitales. Este sistema se encuentra basado en la integración de sensores, microcontroladores y protocolos de comunicación permitiendo la medición de variables de forma continua y automatizada. De acuerdo a Atzori, Iera y Morabito (2010), el IoT es una evolución de las tecnologías de información y comunicación por dotar a objetos físicos de la condición de elementos activos en redes inteligentes, capaces de emitir y compartir información sin la intervención del hombre. En el campo de lo ambiental, esta tecnología ha demostrado ser muy eficiente para la medición de variables como la calidad del aire, temperatura y humedad, permitiendo obtener datos en tiempo real, siendo incluso más barato que los sistemas tradicionales (Mohamad et al., 2024; Mamani, 2024). También el IoT se caracteriza por su escalabilidad, por su aplicación con plataformas en la nube y por la generación de alertas tempranas, lo cual hace que la gestión ambiental sea más certera. Por lo que se refiere a proyectos de infraestructura, esta tecnología permite optimizar el seguimiento de impactos ambientales mediante la implementación del uso de sensores distribuidos para facilitar un control de las condiciones del entorno. Efectivamente, el IoT ha demostrado ser muy efectivo para el seguimiento de impactos, sobre todo en sus diferentes condiciones.

2.1.2. Aplicación del IoT en el monitoreo ambiental

Según Camargo *et al.* (2022), el IoT permite integrar sensores, dispositivos de conversión y servidores en línea para capturar la información ambiental de forma remota. En aplicaciones de monitoreo ambiental, la arquitectura IoT se compone generalmente de una capa de sensado, una capa de comunicación y una capa de servicios donde se guardan y observan los datos obtenidos. Esta estructura facilita la supervisión remota de variables como temperatura, humedad, etc.

2.1.3. Arquitectura IoT para monitoreo ambiental

De acuerdo con Vallejo *et al.* (2024), los sistemas IoT aplicados al monitoreo ambiental permiten integrar tecnologías de código abierto para la adquisición, transmisión y almacenamiento de información. Estas arquitecturas facilitan la escalabilidad, reducen costos de implementación y favorecen la supervisión continua de parámetros ambientales mediante plataformas web.

2.1.4. Influencia de variables meteorológicas

El clima tiene relación muy importante en el proceso de generación, dispersión y deposición del material particulado. La velocidad del viento ayuda a desplazar las partículas por el aire, la humedad relativa puede estar implicada en la re-suspensión o deposición del polvo, la temperatura y la estabilidad de la atmósfera inciden en la dispersión de los contaminantes, y por último, las lluvias ayudan al proceso de remoción de partículas del aire y al transporte de sedimentos a cuerpos de agua mediante escorrentías (Organización Mundial de la Salud, 2021; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015). De esta manera, el análisis conjunto de estas variables permite entender cómo se comportan los contaminantes en el caso de ambientes por obras viales.

2.1.5. Monitoreo de temperatura y humedad mediante IoT

Sánchez *et al.* (2023) señalan que la aplicación de sistemas IoT para el monitoreo de temperatura y humedad permite obtener información ambiental en tiempo real, facilitando la toma de decisiones y mejora del uso de recursos. Los sensores conectados mediante

redes inalámbricas constituyen una alternativa de bajo costo frente a estaciones meteorológicas convencionales.

2.1.6. Normativa ambiental sobre calidad del aire en el Perú

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire son fundamentales para proteger la salud de la población, ya que establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera. Estos estándares incluyen límites específicos y su cumplimiento es obligatorio para todas las actividades que puedan generar contaminación atmosférica, incluyendo proyectos industriales y obras de infraestructura. La implementación de estas regulaciones es esencial para reducir la exposición de la población a contaminantes nocivos y promover un entorno más limpio y sostenible, garantizando así que el desarrollo económico sea compatible con la conservación del medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.1.7. Viabilidad técnica de sistemas IoT

La viabilidad técnica se traduce a la aptitud de una tecnología para funcionar de manera eficiente y confiable bajo determinadas condiciones operativas. En el contexto de sistemas IoT aplicados al monitoreo ambiental, esta evaluación considera aspectos como la precisión de los sensores, la estabilidad del sistema, la calidad de la transmisión de datos y la interoperabilidad entre dispositivos.

Diversos estudios señalan que, aunque los sistemas IoT presentan ventajas en costo y flexibilidad, aún existen desafíos relacionados con la calidad de los datos, la calibración de sensores y la confiabilidad de las mediciones, especialmente en entornos reales (Buelvas et al., 2023).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Sensor DHT22

Aosong Electronics Co., Ltd. (2023) señala que este sensor es un dispositivo digital diseñado para la medición de temperatura y humedad relativa del aire. Ofrece una mayor precisión y un rango de medición más amplio en comparación con otros sensores de bajo

costo utilizados en aplicaciones IoT. Este sensor puede medir temperaturas entre -40°C y 80°C .

2.2.2. Sensor DHT11

Aosong Electronics Co., Ltd. (2023) indica que este sensor es un dispositivo digital de bajo costo utilizado para medir temperatura y humedad relativa. Aunque presenta una menor precisión que el sensor DHT22, es ampliamente empleado en proyectos educativos y prototipos de monitoreo ambiental debido a su facilidad de integración con plataformas de desarrollo como Arduino y ESP32. Su rango se encuentra entre 0°C y 50°C , mientras que para humedad relativa oscila entre 20 % y 90 %.

2.2.3. Placa ESP32

Espressif Systems (2025) menciona que la ESP32 es una placa de desarrollo basada en un microcontrolador de bajo consumo energético que incorpora conectividad WiFi y Bluetooth. Fue diseñada para aplicaciones del Internet de las Cosas gracias a su bondad de lectura, conexión integrada y funcionalidad con diversos sensores y protocolos de comunicación. Estas características aseguran la adquisición, conversión y envío de datos en tiempo real hacia plataformas de almacenamiento en la nube.

2.2.4. Panel solar

La International Energy Agency (IEA, 2024) señala que un panel solar es un dispositivo compuesto por celdas fotovoltaicas capaces de transformar la energía proveniente del sol en energía eléctrica utilizable. Estos sistemas son ampliamente utilizados para alimentar estaciones de monitoreo remoto e infraestructuras IoT debido a su capacidad para proporcionar energía renovable en lugares que no tienen acceso permanente a la red eléctrica convencional.

2.2.5. Estación meteorológica

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2023) define una estación meteorológica como un conjunto de instrumentos y sensores destinados a medir y registrar variables atmosféricas como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar. La información permite caracterizar el

clima de una zona determinada y constituye una referencia fundamental para la validación de sistemas alternativos de monitoreo ambiental.

2.2.6. Internet de las Cosas (IoT)

El IoT se define como el conjunto de dispositivos interconectados que permiten la recopilación, transmisión y procesamiento de datos a través de internet, integrando sensores y sistemas de comunicación para automatizar procesos y generar información en tiempo real. Esta tecnología ha evolucionado como una infraestructura clave para aplicaciones en diversos campos, especialmente en el monitoreo ambiental (Talavera et al., 2017).

2.2.7. Plataforma IoT

De acuerdo con la norma ISO/IEC 30141 (International Organization for Standardization, 2018), una plataforma IoT constituye una infraestructura tecnológica que permite la recopilación, almacenamiento, procesamiento, intercambio y visualización de los datos generados por dispositivos conectados a Internet.

2.2.8. Corriente alterna (CA)

Endesa (2024) lo define como el sistema más utilizado para la distribución de energía eléctrica en viviendas, industrias e instituciones debido a su facilidad de transporte a largas distancias mediante transformadores eléctricos. Es el suministro energético presente en las redes eléctricas convencionales que alimentan la mayoría de equipos electrónicos mediante adaptadores o fuentes de alimentación.

2.2.9. Corriente continua (CC)

Endesa (2024) señala que este tipo de corriente es utilizado en baterías, paneles solares, dispositivos electrónicos, sensores ambientales y sistemas basados en microcontroladores como la placa ESP32. En aplicaciones IoT, la corriente continua constituye la fuente de alimentación requerida para asegurar el funcionamiento adecuado de los sensores y módulos de comunicación.

2.2.10. Temperatura ambiental

Variable usada en el estudio de las condiciones atmosféricas, porque revela el nivel de energía térmica que circula en el aire. Su medición es esencial para el análisis climático y la predicción meteorológica. En sistemas IoT, la temperatura es registrada mediante sensores digitales que permiten obtener datos continuos con alta resolución temporal (Ullo y Sinha, 2020).

2.2.11. Humedad relativa

Representa la concentración de vapor de agua presente en el aire respecto con su máxima capacidad de saturación. Este parámetro influye en eventos atmosféricos como la creación de nubes y precipitaciones. En sistemas IoT, se mide mediante sensores electrónicos que permiten monitoreo en tiempo real, facilitando el análisis de variaciones ambientales (Olivera y Vega, 2026).

2.2.12. Sensores ambientales en IoT

Son dispositivos que permiten la captura de datos del entorno. En el monitoreo ambiental, estos dispositivos registran variables como temperatura, humedad y presión, proporcionando información necesaria para el estudio de condiciones atmosféricas.

El desarrollo de sensores de bajo costo ha impulsado la implementación de sistemas IoT en aplicaciones ambientales, permitiendo la generación de datos en tiempo real con una adecuada relación entre costo y precisión (Mamun y Yuce, 2019).

2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO

2.3.1. Ley N.º 28611 – Ley General del Ambiente

La Ley General del Ambiente del Perú, define principios y normas fundamentales para la gestión ambiental en el país, orientándose hacia la protección del entorno y el uso sostenido de los recursos naturales. Reconoce la importancia de contar con información ambiental confiable como base para la toma de decisiones y señala que es responsabilidad del Estado promover el uso de tecnologías adecuadas para el monitoreo ambiental, lo que está relacionado con la implementación de sistemas basados en IoT

para la medición de variables meteorológicas en tiempo real (Congreso de la República del Perú, 2005).

2.3.2. Ley N.º 30754 – Ley Marco sobre Cambio Climático

La Ley Marco sobre Cambio Climático del Perú tiene como objetivo establecer disposiciones para la gestión integral del cambio climático, promoviendo la generación y uso de información climática confiable, además resalta la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y vigilancia climática, lo que justifica la implementación de tecnologías innovadoras como el IoT para mejorar la disponibilidad de datos meteorológicos en regiones específicas como Tacna (Congreso de la República del Perú, 2018).

2.3.3. Ley N.º 27336 – Ley de Desarrollo de las Funciones y Facultades del OSIPTEL

La Ley de Telecomunicaciones del Perú regula el marco de supervisión de los servicios de telecomunicaciones en el país, los cuales son fundamentales para la transmisión de datos y garantiza el uso adecuado de redes de comunicación, asegurando la calidad y continuidad del servicio, aspectos esenciales para el funcionamiento de sistemas de monitoreo en tiempo real. Esta investigación es consciente de respetar los límites legales para el uso de las redes telefónicas y WiFi. (Congreso de la República del Perú, 2000).

2.3.4. ISO 9001:2015 – Sistemas de gestión de calidad

Norma que establece estándares internacionales que son fundamentales para la gestión de calidad en diversos procesos, incluyendo la recolección y tratamiento de datos. La aplicación de estos estándares en sistemas IoT contribuye significativamente a garantizar la confiabilidad, trazabilidad y consistencia de la información obtenida a través de sensores ambientales, lo que resulta esencial para la toma de decisiones informadas y efectivas (ISO, 2015).

2.3.5. ISO/IEC 30141:2018 – Arquitectura de IoT

La norma ISO/IEC 30141 establece un modelo de referencia para arquitecturas IoT, ofreciendo lineamientos esenciales para el diseño, la interoperabilidad y la escalabilidad

de estos sistemas. Esta normativa es crucial para asegurar que los sistemas propuestos cumplan con criterios técnicos adecuados en aspectos como conectividad, procesamiento de datos y seguridad, lo que contribuye a la efectividad y confiabilidad de las soluciones basadas en IoT (ISO, 2018).

2.3.6. Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM – Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire

Documento que determina los criterios técnicos estandarizados para la medición de variables ambientales. Este instrumento busca garantizar que los datos obtenidos sean comparables, confiables y representativos, lo cual es fundamental para los sistemas de monitoreo ambiental basados en sensores (MINAM, 2019).

2.3.7. Decreto Supremo N.º 027-2021-MINAM – Reglamento del SENAMHI

Documento que reconoce al SENAMHI como la entidad responsable de generar información meteorológica oficial en el Perú. Con este decreto, el SENAMHI se establece como un organismo técnico especializado con autonomía para medir, analizar y difundir datos meteorológicos, los cuales son esenciales como referencia nacional para validar sistemas alternativos de monitoreo (MINAM, 2021).

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

La implementación de tecnología IoT es técnicamente viable para el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad en la región de Tacna - 2026, ofreciendo una alternativa de bajo costo, alta disponibilidad y precisión compatible con los estándares de medición.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Los sensores IoT seleccionados presentan un nivel de precisión y exactitud con un margen de error mínimo y aceptable, permitiendo registros de temperatura y humedad altamente correlacionados con los datos de los instrumentos tradicionales.
- La conexión inalámbrica empleada garantiza un alcance de cobertura adecuado y una estabilidad óptima para asegurar la transmisión continua de las variables meteorológicas hacia la plataforma web.

- El sistema de alimentación eléctrica propuesto diseñado en base a la demanda de carga del circuito provee la autonomía energética suficiente para mantener el módulo IoT operando de forma continua, incluso bajo escenarios de baja radiación solar en la zona.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde con la zona urbana de la ciudad de Tacna, constituida por la provincia y la región de Tacna, que se sitúa en un área de contacto entre la costa y el frente occidental de los Andes, donde se produce un área de análisis para el clima local donde la temperatura y la humedad relativa juegan un papel destacado en la definición del microclima urbano, la difusión de las masas de aire o la medida del confort térmico de la población. El área de influencia se sitúa en un área con condiciones de aridez extrema, alta radiación solar y gran marcaje de la temperatura diaria, todos ellos determinantes de la variabilidad meteorológica de la ciudad. Aparte de eso, las características topográficas de Tacna y la construcción de las infraestructuras urbanas y las industrias hace que haya variaciones en la temperatura con independencia del factor temporal, lo que lleva a tener que ir vigilando el clima con continuos ciclos temporales y con alta resolución temporal para captar los cambios climáticos en los diferentes espacios de la ciudad. La dinámica atmosférica de la ciudad de Tacna representa un sistema de gran importancia ambiental y metodológica, por lo que su evaluación mediante parámetros meteorológicos resulta relevante para validar la viabilidad técnica y la precisión de nuevas alternativas tecnológicas de bajo costo, como el Internet de las Cosas (IoT). La correcta medición de estas variables permitió determinar la aptitud y confiabilidad de estos sistemas frente a las condiciones climáticas de la región para su futura integración en redes de monitoreo ambiental.

El punto de monitoreo de los sensores se establece en las coordenadas UTM Zona 19 K,
Este: 367517.95 y Norte: 8006376.80.

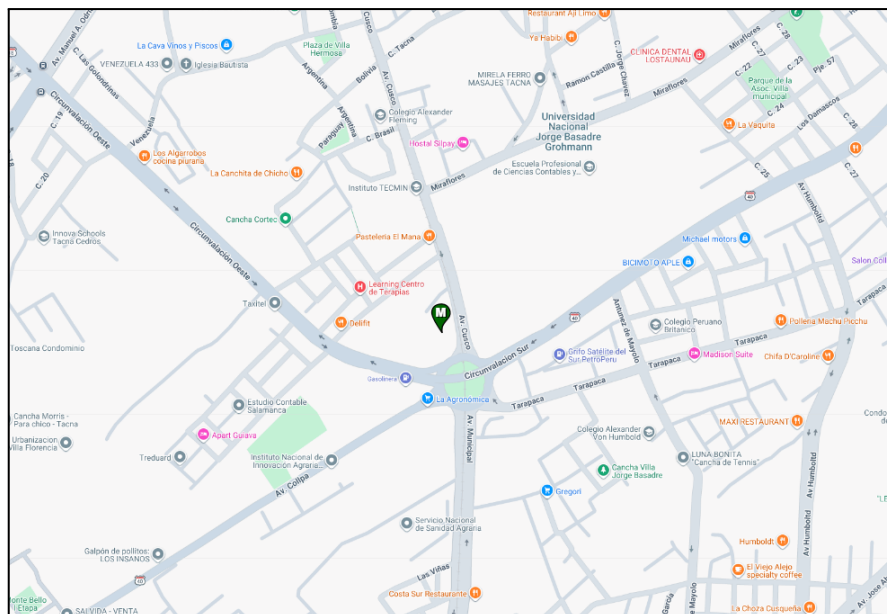


Figura 01: Mapa de ubicación de estación meteorológica UNJBG

Fuente: (Google Maps, 2026)



Figura 02: Imagen satelital de estación meteorológica UNJBG

Fuente: (Google Maps, 2026)

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población objeto de la investigación está constituida por el conjunto de condiciones ambientales de la zona de estudio correspondiente al tiempo de muestreo, y que se encuentran definidas en las concentraciones de los parámetros meteorológicos. Las condiciones ambientales fueron evaluadas mediante registros de datos obtenidos por equipo tradicional acreditado y por sensores IoT, con el objetivo de llevar a cabo el análisis de la viabilidad técnica de su uso en monitoreo ambiental.

3.2.2. MUESTRA

La muestra quedó conformada por registros de datos obtenidos de forma simultánea mediante sensores IoT y equipo tradicional acreditado dispuesto en los puntos de monitoreo propuestos sobre el instrumento de gestión ambiental declarado vigente en el área de estudio. Los registros de la muestra se correlacionaron con los datos de mediciones de parámetros meteorológicos durante el periodo de muestreo ambiental.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.3.1. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación presentó un alcance descriptivo-correlacional, puesto que inicialmente describió el comportamiento de las variables medidas por el sistema IoT y por la estación meteorológica de referencia, para luego determinar el grado de relación existente entre ambas mediciones mediante cálculos estadísticos. De esta manera, fue posible establecer si el sistema desarrollado ofrecía resultados técnicamente comparables con los obtenidos por el equipo convencional.

3.3.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, dado a que se basó en la obtención de datos numéricos provenientes de las mediciones de temperatura y humedad relativa registradas por un sistema de monitoreo basado en tecnología IoT y una estación meteorológica de referencia del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Estos datos fueron procesados mediante técnicas de

análisis estadístico con la finalidad de determinar el grado de precisión, exactitud, confiabilidad y correlación existente entre ambos sistemas de medición. El enfoque cuantitativo permitió evaluar objetivamente la viabilidad técnica de la tecnología IoT mediante indicadores estadísticos que sustentaron la comparación entre los valores registrados por ambos equipos.

3.3.3. DISEÑO METODOLÓGICO

La investigación se desarrolló bajo un diseño no experimental, de campo y de corte transversal. Fue no experimental porque las variables de estudio no fueron manipuladas deliberadamente, sino que se observaron y registraron tal como se presentaron durante el periodo de monitoreo. Fue de campo, debido a que la recolección de información se realizó directamente en las condiciones ambientales reales del área de estudio, mediante la instalación y funcionamiento simultáneo del sistema IoT y la estación meteorológica de referencia. Asimismo, fue de corte transversal, ya que los datos fueron obtenidos durante un periodo específico de evaluación, permitiendo analizar el comportamiento de ambos sistemas en las mismas condiciones ambientales y establecer su grado de concordancia mediante indicadores estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson, el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

3.3.4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO Y LA TÉCNICA

El presente método de investigación consistió en el desarrollo e implementación de un sistema basado en tecnología IoT para el monitoreo de parámetros meteorológicos de temperatura y humedad en la ciudad de Tacna. Para ello, se integraron sensores IoT conectados a una placa ESP32 WiFi que permitió la captura, transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real hacia una plataforma digital como lo es ThingSpeak. Posteriormente, se realizó el seguimiento continuo de las mediciones obtenidas, el análisis de indicadores como la precisión de los registrados, la estabilidad de la transmisión y la confiabilidad del funcionamiento durante el periodo de monitoreo.

Los resultados obtenidos fueron comparados con información de referencia proveniente de estaciones meteorológicas convencionales o fuentes oficiales, con la finalidad de determinar la viabilidad técnica de la tecnología IoT para el monitoreo de variables meteorológicas en las condiciones ambientales de Tacna.

Para la realización de la investigación se replicó la metodología del Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Aire, así como el cumplimiento de los lineamientos y criterios técnicos establecidos por el SENAMHI en la Resolución Presidencial Ejecutiva N° 0174 SENAMHI-PREJ-OGOT/2013.

A. Criterios de Ubicación y Macrolocalización

El protocolo exige que la ubicación de la estación garantice que los datos representen las condiciones reales del entorno y no interferencias puntuales.

i. **Escala de Representatividad:** Se clasificó el monitoreo en escala local o urbana que representa áreas de cientos de metros hasta unos pocos kilómetros.

ii. Requerimientos Técnicos para la instalación de estaciones meteorológicas

En el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Aire, en la Tabla 10, se menciona los requerimientos técnicos para los parámetros de Temperatura Ambiental y Humedad relativa el cual se detalló por tipo a continuación:

- .Temperatura Ambiental:
 - o Distancia de un obstáculo: 1.5 veces el diámetro de la torre.
 - o Altura respecto al suelo: 1.25 m a 2 m.
- .Humedad relativa:
 - o Distancia de un obstáculo: 1.5 veces el diámetro de la torre.
 - o Altura respecto suelo: 1.25 m a 2 m.

B. Calibración

El proceso de calibración concierne de manera estricta a los instrumentos destinados a cuantificar cualquier tipo de magnitud, por lo que la totalidad de los equipos de medición fueron sometidos obligatoriamente a este procedimiento. Entre ellos se encuentra el parámetro de sensores de temperatura.

En este escenario, los sistemas evaluados requieren una calibración sustentada en la comparación directa con un instrumento patrón de mayor exactitud, el cual debe poseer trazabilidad demostrada hacia un patrón primario específico. Asimismo, se permite el empleo de patrones de transferencia, a condición de que quede debidamente acreditada su trazabilidad hacia el Sistema Internacional de Unidades (SI). En situaciones donde la vinculación técnica con las unidades del SI resulte inviable, será mandatorio comprobar la trazabilidad metrológica hacia una referencia adecuada o patrón primario (MINAM, 2019). Los criterios técnicos base para la calibración de equipos de muestreo activo y equipos automáticos, el valor de la temperatura se rigió bajo estos siguientes rangos:

Tabla 01: Criterio técnico base para la calibración de equipos de muestreo activo

Variable	Frecuencia	Error máximo permitido	Procedimiento de calibración
Temperatura	Anual o después de mantenimiento correctivo	$\pm 2.1^{\circ}\text{C}$	Según norma técnica del método de monitoreo (tabla 6) (Del Protocolo en mención) y/o manual del fabricante.

El control de calidad aplicado a los dispositivos de medición meteorológica orientados al monitoreo del aire demanda el cumplimiento de los requerimientos técnicos coordinados entre el SENAMHI y el INACAL. A falta de lineamientos domésticos, la trazabilidad y estandarización del proceso de calibración fueron respaldados legal y técnicamente bajo las recomendaciones internacionales de la Organización Meteorológica Mundial en su "Guía de Instrumentos y Métodos de Observación - Edición de 2014 actualizada en 2017 - Parte I: Medición de variables meteorológicas". especializadas en la medición de parámetros de la atmósfera.

C. Operación

C1. Verificación Previa:

Para la medición de los parámetros de estudio, la norma indica que en campo, antes del inicio de operación de la estación, antes del inicio de cada campaña de monitoreo, o una vez por mes debe ser la frecuencia para la verificación previa de la temperatura y humedad.

C2. Verificación Durante:

Para la verificación de los parámetros de estudio, la norma también indica que durante el muestreo o el manejo de la muestra de equipo el análisis estadístico se basa en las máximas, mínimas o diferencias, por ejemplo, diferencia de temperatura interna y externa.

En los dos supuestos se especifica que el registro de los niveles térmicos a lo largo de cualquier procedimiento de calibración o verificación tiene que considerar los diversos sensores de temperatura empleados en las etapas previa, simultánea y posterior al muestreo.

D. Procesamiento y reporte de la información del monitoreo

El tratamiento de los datos recolectados en la vigilancia atmosférica comprendió una secuencia de etapas destinadas a recopilar los registros obtenidos en campo y ejecutar las operaciones matemáticas requeridas, logrando consolidar la información que define la condición del entorno. Esta etapa analítica se ejecutó mediante procedimientos manuales de gabinete o a través de herramientas y algoritmos computacionales automatizados. Por su parte, la fase de reporte implicó la estructuración y sistematización de dichos resultados para su difusión en plataformas físicas o virtuales, facilitando su almacenamiento en servidores y su visualización en tiempo real mediante interfaces web dedicadas (MINAM, 2019).

D1. Data cruda

La etapa inicial en la gestión de la información consistió en compilar los datos originales o brutos, los cuales fueron adjuntados obligatoriamente a cada informe de monitoreo

respetando el formato nativo provisto por el instrumental. Estos registros no sufrieron modificaciones o ediciones.

- ☐ Se priorizó que la transferencia de datos desde la memoria interna de los dispositivos de medición hacia el registrador sea realizada mediante canales digitales.
- ☐ Bajo cualquier circunstancia, la programación del registrador de datos careció de rutinas o algoritmos de cálculo que pudieran haber modificado los valores reportados de las concentraciones de los parámetros de calidad del aire.

Los registros originales o en bruto se conservaron e integraron respetando la extensión nativa del dispositivo (*.dat, *.txt, *.csv o la establecida por el fabricante). Esta información se difundió en tiempo real a través de una plataforma web designada, cumpliendo con las directrices del apartado L.1.1 del Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Aire.

D2. Validación de los datos de monitoreo

Para poder validar los datos de monitoreo, todo este procesamiento tomó en consideración la siguiente información para el procesamiento de datos de temperatura y humedad.

- Data original (cruda).
- Formatos (Checks) y Bitácora de Campo.

Con respecto a la información recopilada, fue necesario comprobar que satisfaga, como mínimo, las siguientes pautas de control:

- ☐ Que se hayan respetado a cabalidad las pautas técnicas de montaje, calibración, funcionamiento, mantenimiento y demás requerimientos fijados en esta investigación.
- ☐ Para aquellos dispositivos equipados con sistemas de aviso por falla o alerta, se constató, mediante su respectivo manual técnico, que el estado operativo se mantenga de forma permanente en modo normal o su denominación análoga.

En caso de detectarse el incumplimiento de cualquiera de las pautas anteriores, se tuvo que proceder de la siguiente manera:

- ☐ Definir el intervalo de tiempo exacto durante el cual se presentó la falla, especificando las estaciones, los instrumentos y los parámetros involucrados, además de las pautas vulneradas.
- ☐ Marcar los datos de medición observados utilizando los códigos o indicadores determinados por la entidad a cargo de la red de monitoreo, implementando para ello un esquema de banderas o un método equivalente.
- ☐ Excluir definitivamente del informe final de datos validados todo registro de monitoreo que no haya superado los filtros de control.
- ☐ Investigar las causas que originaron las inconsistencias en la información, con el fin de aplicar las medidas de corrección necesarias y mitigar los riesgos en las subsecuentes campañas de medición.
- ☐ Registrar documentalmente los resultados derivados de este análisis e incorporarlos como anexo en cada reporte de monitoreo emitido.

Tras definir el marco metodológico para la recopilación de datos de la estación meteorológica base, cuyo procedimiento fue replicado de forma sistemática por el sensor propuesto, se desglosa el desarrollo de la infraestructura de *hardware*. Los siguientes subapartados especifican la construcción y cableado de la placa ESP32 que actúa como soporte operativo del sensor DHT22. Del mismo modo, se describe el código fuente desarrollado en el entorno Arduino, el cual rige el comportamiento del sistema embebido y automatiza la transferencia de los registros térmicos e higrométricos hacia la plataforma IoT ThingSpeak.

E. Arquitectura de Hardware y Transmisión de Datos

En este apartado se expone la estructura y el flujo de la interconexión conectiva de los distintos componentes electrónicos que conforman el nodo de monitoreo meteorológico. Se describe la elección y la interconexión de los dispositivos físicos que llevan a cabo el proceso de conversión analógica-digital de las variables ambientales de temperatura y humedad, los sistemas de soporte energético de los dispositivos, y se describe, también, la implementación de los módulos de comunicación inalámbrica. Se exponen los

protocolos de red que se han implementado, los cuales han venido a establecer la integridad, la estabilidad y la sincronización en la transferencia de la información que viene empaquetada desde el punto de medición en campo hacia la plataforma receptora en la nube.

- **Unidad Central de Procesamiento:** Como núcleo del nodo de monitoreo se seleccionó el microcontrolador ESP32, específicamente el módulo ESP-WROOM-32 integrado en la placa de desarrollo NodeMCU. Esta unidad central de procesamiento cuenta con un microprocesador de doble núcleo Tensilica Xtensa de 32 bits que opera a una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz, provisto de una memoria SRAM interna de 520 KB. El dispositivo fue seleccionado debido a sus prestaciones nativas de conectividad inalámbrica bajo el estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth, lo cual viabiliza la transmisión de datos sin requerir módulos de red periféricos. Asimismo, su arquitectura dispone de Pines de Entrada/Salida de Propósito General (GPIO) con soporte para modulación por ancho de pulsos (PWM), convertidores analógico-digitales (ADC) y protocolos de comunicación serial, garantizando el acoplamiento y la gobernanza de los sensores del sistema.

- **Unidad de Sensorización Ambiental:** Para la captura de las variables termo-higrométricas se implementó el sensor digital DHT22. Este componente integra un sensor capacitivo de humedad relativa y un termistor para la medición de temperatura, acoplados a un microcontrolador de 8 bits que emitió una señal digital calibrada mediante un protocolo de comunicación unifilar. El módulo operó en un rango técnico de medición de temperatura desde -40 °C hasta 80 °C y en un rango de humedad relativa de 0% a 100%.

- **Entorno de Desarrollo y Lógico de Programación**

El soporte lógico y la automatización del nodo de monitoreo se estructuraron mediante el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino, lenguaje de programación de alto nivel basado en C/C++. El código fuente cargado en el microcontrolador gestiona de forma

secuencial los ciclos de inicialización, lectura y transmisión mediante dos bloques de instrucciones principales: el Setup y el Loop.

Dentro de la función de configuración inicial (Setup), el firmware estableció la velocidad de comunicación serial a 115200 baudios para el diagnóstico local, inicializa los pines correspondientes al bus de datos del sensor DHT22 e invocó los parámetros de red para el acoplamiento automático a la red Wi-Fi local.

En el ciclo iterativo (*Loop*), el algoritmo ejecutó de manera sistemática las siguientes fases operativas:

- o **Adquisición Digital:** El microcontrolador interroga al sensor DHT22 utilizando la librería especializada <DHT.h>, abstrayendo las lecturas de los pulsos digitales en variables flotantes de temperatura (°C) y humedad relativa (%).
- o **Estructuración del Paquete:** Se procesaron y empaquetaron las variables físicas junto con las credenciales de acceso del canal y la API Key de ThingSpeak a través de la librería <WiFi.h>.
- o **Transmisión Dinámica:** El código realiza una petición HTTP POST hacia la dirección IP del servidor en la nube, enviando los datos en formato de cadena de texto.
- o **Temporización del Sistema:** Una vez verificada la respuesta del servidor, el firmware ejecutó una instrucción de retardo (*Delay*) programada de forma secuencial, manteniendo al microcontrolador en espera hasta el siguiente ciclo de muestreo para evitar la saturación del canal de transmisión.

▪ **Sistema de Alimentación y Soporte Energético**

En el diseño de la arquitectura eléctrica del prototipo se decidió que debe poder ofrecer un flujo de energía que sea de forma constante, de forma estabilizada, capaz de prevenir el descenso de tensiones durante los picos de consumo que se dan a raíz de la transmisión inalámbrica. Aunque nativamente el microcontrolador ESP32 funciona a un voltaje de 3.3 V, la placa de desarrollo que utiliza un regulador de voltaje lineal LDO que permite la entrada de alimentación externa de 5 V a través del puerto micro-USB o del pin Vin que alimenta el microcontrolador. El soporte energético también se estructuró a partir

de una fuente de alimentación regulada de corriente continua (AC/DC) que se conectaba a la red eléctrica local, con una salida nominal de 5 V, y una capacidad de corriente de 2 A, por lo que fue necesario tener autonomía operativa y seguir muestreando de forma continua a lo largo de toda la campaña de monitoreo.

▪ **Infraestructura de Red y Almacenamiento**

La gestión, almacenamiento y visualización de los datos meteorológicos recolectados se realizó a través de la plataforma de Internet de las Cosas (IoT) ThingSpeak. La transferencia de la información desde el microcontrolador hacia el servidor en la nube se ejecutó de manera inalámbrica mediante solicitudes estructuradas HTTP bajo el método POST, empleando una clave de interfaz de programación de aplicaciones (API Write Key) para la autenticación y seguridad del canal. La base de datos en el servidor fue configurado mediante canales específicos, asignando el Campo 1 para la variable de temperatura y el Campo 2 para la humedad relativa. Este esquema analítico permitió la recepción secuencial de los datos empaquetados, facilitando el procesamiento estadístico, el respaldo masivo de la información y la graficación de los parámetros en tiempo real.

▪ Código para Arduino

```
#include <WiFi.h>
#include <DHT.h>
#include <ThingSpeak.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
#include <math.h> // Para cálculos matemáticos
// ----- CONFIGURACIÓN DE SENSORES -----
#define DHTPIN_22 4
#define DHTTYPE_22 DHT22
DHT dht22(DHTPIN_22, DHTTYPE_22);
#define DHTPIN_11 14
#define DHTTYPE_11 DHT11
DHT dht11(DHTPIN_11, DHTTYPE_11);
Adafruit_BMP085 bmp;
// ----- CONFIGURACIÓN WIFI Y THINGSPEAK -----
const char* ssid = "iPhone";
const char* password = "atreyumochito";
WiFiClient client;
unsigned long channelId = 3237869; // REEMPLAZA CON TU NUEVO ID DE CANAL
const char* writeAPIKey = "6A2XQ1CXMJEQTCFB"; // REEMPLAZA CON TU NUEVA KEY
unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 20000;
// Función para calcular el Punto de Rocío (Dew Point)
float calculateDewPoint(float temp, float hum) {
    float a = 17.27;
    float b = 237.7;
    float alpha = ((a * temp) / (b + temp)) + log(hum / 100.0);
    return (b * alpha) / (a - alpha);
}
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(1000);
    dht22.begin();
    dht11.begin();

    if (!bmp.begin()) {
        Serial.println("BMP180 no detectado!");
    }
    WiFi.begin(ssid, password);
```

```
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
}
Serial.println("\nWiFi Conectado.");
ThingSpeak.begin(client);
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();
    if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
        previousMillis = currentMillis;
        // Lecturas
        float t22 = dht22.readTemperature();
        float h22 = dht22.readHumidity();
        float t11 = dht11.readTemperature();
        float h11 = dht11.readHumidity();
        float tBmp = bmp.readTemperature();
        float pBmp = bmp.readPressure() / 100.0F;
        float aBmp = bmp.readAltitude();
        Serial.println("--- NUEVA LECTURA ---");
        // Lógica para el Punto de Rocío (usando DHT22)
        float dewPoint = 0;
        if (!isnan(t22) && !isnan(h22)) {
            dewPoint = calculateDewPoint(t22, h22);
            ThingSpeak.setField(1, t22);
            ThingSpeak.setField(2, h22);
            ThingSpeak.setField(8, dewPoint);
            Serial.printf("DHT22: T: %.1f C | H: %.1f%% | Punto Rocío: %.1f C\n", t22, h22, dewPoint);
        }
        // DHT11
        if (!isnan(t11) && !isnan(h11)) {
            ThingSpeak.setField(3, t11);
            ThingSpeak.setField(4, h11);
            Serial.printf("DHT11: T: %.1f C | H: %.1f%%\n", t11, h11);
        }
        // BMP180
        if (tBmp < 100 && tBmp > -40) {
            ThingSpeak.setField(5, tBmp);
            ThingSpeak.setField(6, pBmp);
            ThingSpeak.setField(7, aBmp);
        }
    }
}
```

```
Serial.printf("BMP180: T:%.1f C | P:%.1f hPa | Alt:%.1f m\n", tBmp, pBmp, aBmp);  
}  
// Enviar a ThingSpeak  
int response = ThingSpeak.writeFields(channelID, writeAPIKey);  
if (response == 200) {  
    Serial.println(">> Datos enviados a ThingSpeak con éxito.");  
} else {  
    Serial.printf(">> Error de envío: %d\n", response);  
}  
}  
}
```

3.4. DISEÑO METODOLÓGICO POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 01

Determinar la precisión y exactitud de los sensores IoT seleccionados para la medición de temperatura y humedad mediante la comparación con instrumentos meteorológicos tradicionales.

A. Técnica de muestreo y referencia normativa:

La recogida de datos se ejecutó mediante un proceso de seguimiento ininterrumpido y la observación de las variables meteorológicas, tomando en cuenta lo que se considera una referencia técnica. Se constituyeron las pautas referidas por el SENAMHI y los lineamientos que establece el Protocolo Nacional de Monitoreo Ambiental; estos dos aspectos permitieron la garantía de unos requisitos adecuados para la instalación, funcionamiento y control de calidad de los equipos que se utilizaron en la investigación.



Figura 03: Frentera de área de la estación meteorológica del SENAMHI

Fuente: Elaboración propia

B. Materiales y equipos utilizados

- Placa ESP32

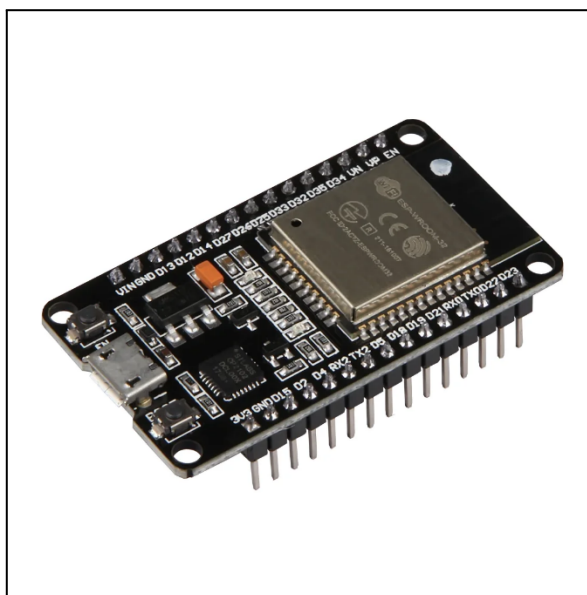


Figura 04: Módulo de ESP32 utilizado en el estudio

Fuente: (Mechatronics Laboratory, 2026)

- Sensor DHT22

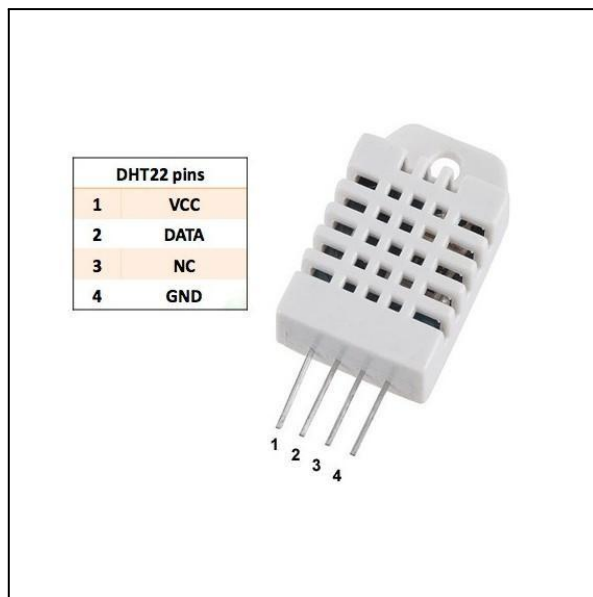


Figura 05: Sensor DHT 22 con terminales de comunicación

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2026)

- Estación meteorológica de referencia



Figura 06: Estación meteorológica Davis

Fuente: (Envirotechlab, 2026)

- Computadora para procesamiento de datos

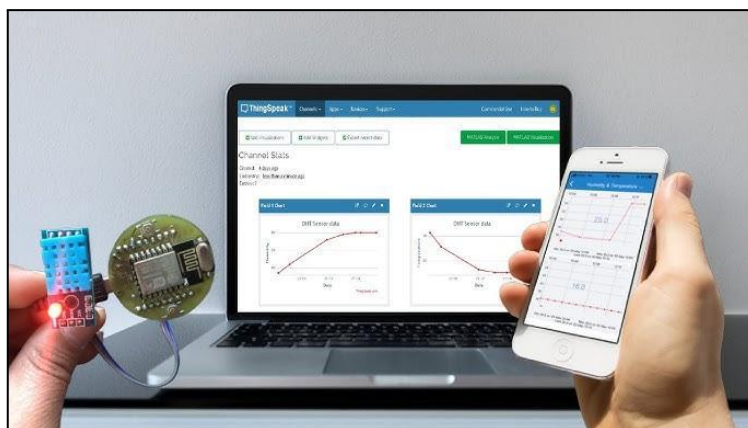


Figura 07: Laptop para visualización remota de lectura de datos por sensor DHT22

Fuente: (ThingSpeak, 2026)

- Plataforma ThingSpeak.

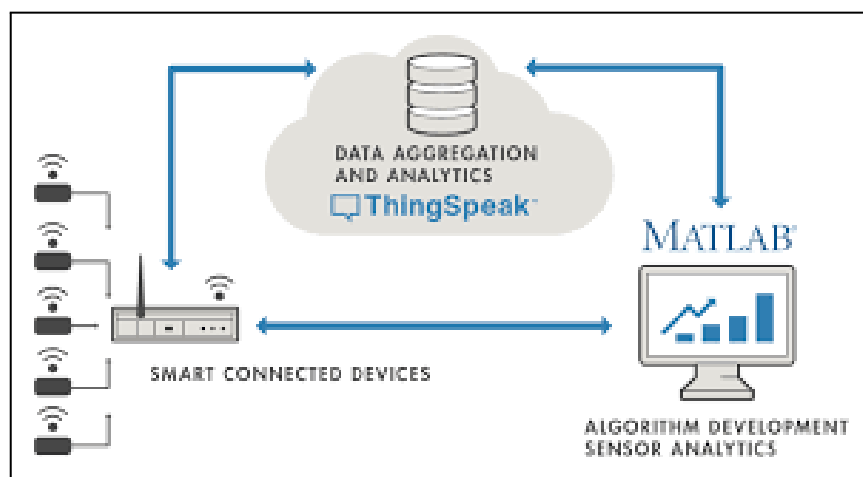


Figura 08: Portada de plataforma ThingSpeak para visualización de data cruda en campo

Fuente: (ThingSpeak, 2026)

C. Procedimiento para la toma de muestras

La recogida de datos se hizo mediante un proceso de seguimiento ininterrumpido y la observación de las variables meteorológicas de temperatura y humedad detallados en el ítem 2.4.5. *Descripción del método*, tomando en cuenta lo que se considera una referencia técnica. Se constituyeron las pautas referidas por el SENAMHI y los lineamientos que establece el protocolo a considerar.

D. Análisis de las muestras

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo y comparativo. Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, así como indicadores de desempeño tales como error absoluto, error porcentual y coeficiente de correlación. Estos resultados permitieron evaluar el nivel de concordancia existente entre las mediciones realizadas por el sistema IoT y aquellas registradas por la estación meteorológica de referencia, determinando así la precisión y exactitud del sistema propuesto.

3.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 02

Analizar el alcance y la estabilidad de la conexión inalámbrica empleada para la transmisión de los datos meteorológicos desde el punto de captura hasta la plataforma web.

A. Técnica de evaluación

La evaluación se realizó mediante el monitoreo continuo de la transmisión de datos generados por el sistema IoT durante todo el período de operación, por ello, se consideraron los criterios de confiabilidad y continuidad dentro de la propia plataforma de ThingSpeak y revisar remotamente que los dispositivos no tengan interrupciones y se actualicen cada (01) minuto.

B. Materiales considerados

Se utilizó la placa ESP32 con conectividad WiFi integrada, un punto de acceso inalámbrico con conexión a Internet, la plataforma ThingSpeak para la recepción de datos y una computadora destinada al seguimiento y verificación de los registros transmitidos cada (01) minuto.

C. Procedimiento para la conformidad de lectura

Durante el periodo de monitoreo, el sistema IoT transmitió automáticamente los registros de temperatura y humedad hacia la plataforma ThingSpeak a intervalos previamente programados. Se verificó continuamente la recepción de la información y si se registraron posibles interrupciones, pérdidas de datos o fallas de comunicación que pudieran afectar

la toma de muestras y evitar que posteriormente los cálculos no tengan datos representativos.

Se analizaron los registros almacenados en la plataforma web para determinar la continuidad de la transmisión. Se evaluó el porcentaje de datos recibidos correctamente, la frecuencia de interrupciones y la estabilidad de la comunicación durante el monitoreo. Se verificó empíricamente la confiabilidad de la infraestructura de comunicación utilizada por el sistema IoT.

3.4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 03

Verificar la capacidad y continuidad del sistema de alimentación eléctrica propuesto para mantener el equipo IoT operando de forma continua y sin interrupciones.

A. Técnica de observación para fuente eléctrica

La evaluación se efectuó mediante observación directa y seguimiento continuo del comportamiento energético del sistema durante todo el periodo de monitoreo, verificando su capacidad para operar de manera estable y permanente.

B. Requisitos técnicos a considerar para la fuente eléctrica

Se empleó una fuente de alimentación regulada de 5 V, la placa ESP32, el sensor DHT22, también se contó con un multímetro digital para la verificación de los componentes en caso de que no se genere el suficiente voltaje o si algún componente se encuentra dañado.

C. Procedimiento para verificación de continuidad de suministro eléctrico

Se verificó que el sistema permanezca continuo durante el período de monitoreo programado. Se registró el tiempo de operación, la estabilidad de la alimentación eléctrica y la ocurrencia de posibles interrupciones que pudieran afectar la adquisición o transmisión de los datos meteorológicos. Asimismo, se verificó periódicamente el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos que conformaban el sistema.

Los registros obtenidos fueron analizados para determinar la continuidad operativa del sistema. Se evaluó el tiempo efectivo de funcionamiento, la estabilidad de la alimentación eléctrica y la ausencia de interrupciones durante la campaña de monitoreo. Con base en

estos resultados se determinó la capacidad del sistema energético para garantizar la operación continua del prototipo IoT bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Tacna.

3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Tabla 02: Identificación de variables del estudio

Tipo de variable	Variable
Variable Independiente	Tecnología IoT aplicada al monitoreo meteorológico
Variable Dependiente	Viabilidad técnica del sistema de monitoreo meteorológico

3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 03: Operacionalización de variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente:	Precisión de medición	Error absoluto de temperatura (%), Error absoluto de humedad (%)
	Transmisión de datos	Porcentaje de datos transmitidos correctamente, Continuidad de transmisión (%)
	Sistema de alimentación	Tiempo de operación continua (h), Número de interrupciones registradas
	Exactitud de las mediciones	Grado de concordancia con estación de referencia, Coeficiente de correlación (R)
	Confiabilidad operativa	Disponibilidad del sistema (%), Estabilidad de funcionamiento
Variable Dependiente:	Desempeño técnico	Cumplimiento de objetivos de monitoreo, Funcionamiento continuo durante el periodo de evaluación

3.7. DISEÑO ESTADÍSTICO

Los datos recolectados por medio de la estación meteorológica de referencia y del sistema IoT fueron dispuestos en una base de datos Excel para que posteriormente se procesaron estadísticamente. Para ello, se realizó primero un análisis descriptivo utilizando gráficos y tablas. Para las variables de temperatura y humedad, se calcularon

la media aritmética como una medida de tendencia central y la desviación estándar como una medida de dispersión.

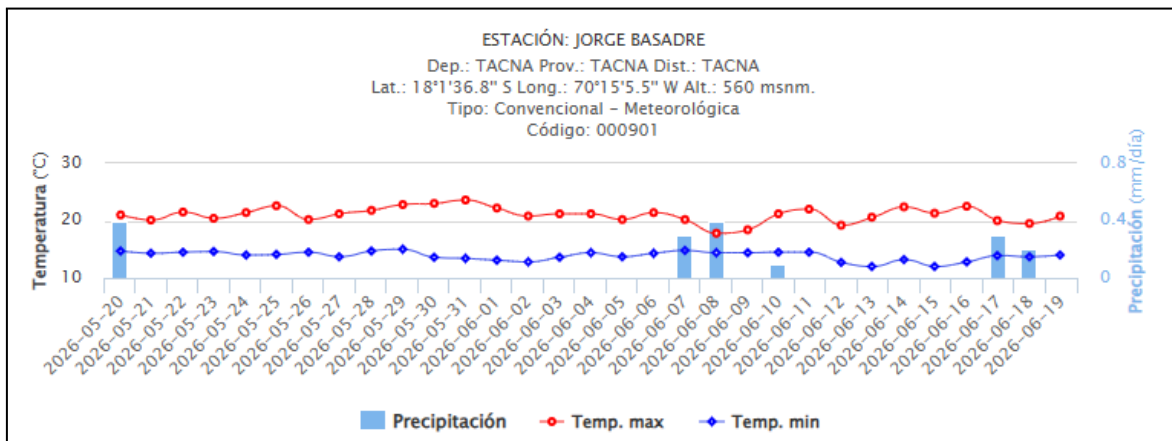
Después, se realizó un análisis comparativo entre los dos sistemas de medida. Este análisis consistió en calcular el error absoluto y el error relativo porcentual, así como el coeficiente de correlación de Pearson. El objetivo fue establecer hasta qué punto coincidían las medidas que proporcionaba la estación meteorológica de referencia con las que ofrecía el sistema IoT.

Los resultados fueron presentados mediante tablas y gráficos comparativos que permitieron valorar la exactitud, fiabilidad y viabilidad técnica del sistema IoT para el monitoreo de temperatura y de humedad en el punto de monitoreo evaluado.

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. DATA DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL SENAMHI



AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		HUMEDAD RELATIVA (%)	PRECIPITACIÓN (mm/día)
	MAX	MIN		TOTAL
2026-05-01	24.4	15.7	76.4	0.0
2026-05-02	22	15.3	78.7	0.0
2026-05-03	22.4	15.7	78.9	0.0
2026-05-04	24.6	15.3	79.3	0.0
2026-05-05	25.7	15.4	66.7	0.0
2026-05-06	26	15.7	76.8	T
2026-05-07	23	16.6	77.6	0.1
2026-05-08	21	15.9	86.3	T
2026-05-09	23.6	16	77.5	T
2026-05-10	24.4	15.3	75.4	0.0
2026-05-11	24.8	16.4	76.4	0.0
2026-05-12	24	16.7	78.2	T
2026-05-13	22.8	15.7	80.4	0.0
2026-05-14	24	16	76.0	0.0
2026-05-15	22.8	15.2	76.3	0.0
2026-05-16	22.4	15.2	77.5	0.0
2026-05-17	22.1	15.8	76.2	0.0
2026-05-18	22	15.7	77.6	0.0
2026-05-19	21.2	15.3	77.9	T
2026-05-20	21	14.7	78.0	0.4
2026-05-21	20.1	14.3	80.1	0.0
2026-05-22	21.5	14.5	78.1	0.0
2026-05-23	20.4	14.6	80.0	0.0
2026-05-24	21.4	14	80.8	0.0
2026-05-25	22.6	14.1	77.5	T
2026-05-26	20.2	14.5	79.7	0.0
2026-05-27	21.2	13.7	79.0	0.0
2026-05-28	21.8	14.7	78.4	0.0
2026-05-29	22.8	15	75.9	0.0
2026-05-30	23	13.6	77.8	0.0
2026-05-31	23.6	13.4	77.7	0.0

4.2. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 01

Determinar la precisión y exactitud de los sensores IoT seleccionados para la medición de temperatura y humedad mediante la comparación con instrumentos meteorológicos tradicionales.

4.2.1. DESCRIPCIÓN DE MONITOREO

La consideración de data comenzó a partir del 01 de mayo desde las 00:00 horas hasta el 31 de mayo hasta las 23:59 horas, lo que corresponde a todo el mes de mayo, donde se obtuvo 77036 datos por humedad y temperatura para cada sensor. Se tomó así para capturar la mayor cantidad de data en un periodo de tiempo medible según la información publicada en el SENAMHI a través de su portal web, mediante un archivo CSV de acceso público el cual sirvió para hacer los contrastes de los estadísticos respectivos.

4.2.2. GRÁFICOS ESTADÍSTICOS

4.2.2.1. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS

A. Estadísticos descriptivos de temperatura con sensor DHT22

Tabla 04: Medidas de tendencia central de los valores de temperatura en sensor DHT22

Media	18.92 °C
Mediana	18.81 °C
Moda	15.80 °C

Tabla 05: Medidas de dispersión de los valores de temperatura en sensor DHT22

Mínimo absoluto	13.10 °C
Máximo absoluto	26.30 °C
Varianza muestral	8.24
Desviación Estándar	2.87 °C

Tabla 06: Cuantiles y comportamiento de los valores de temperatura en sensor DHT22

Cuartil 1 (Q1 – 25%)	16.45°C
Cuartil 3 (Q3 – 75%)	21.18°C
Rango Intercuartílico (IQR)	4.73 °C

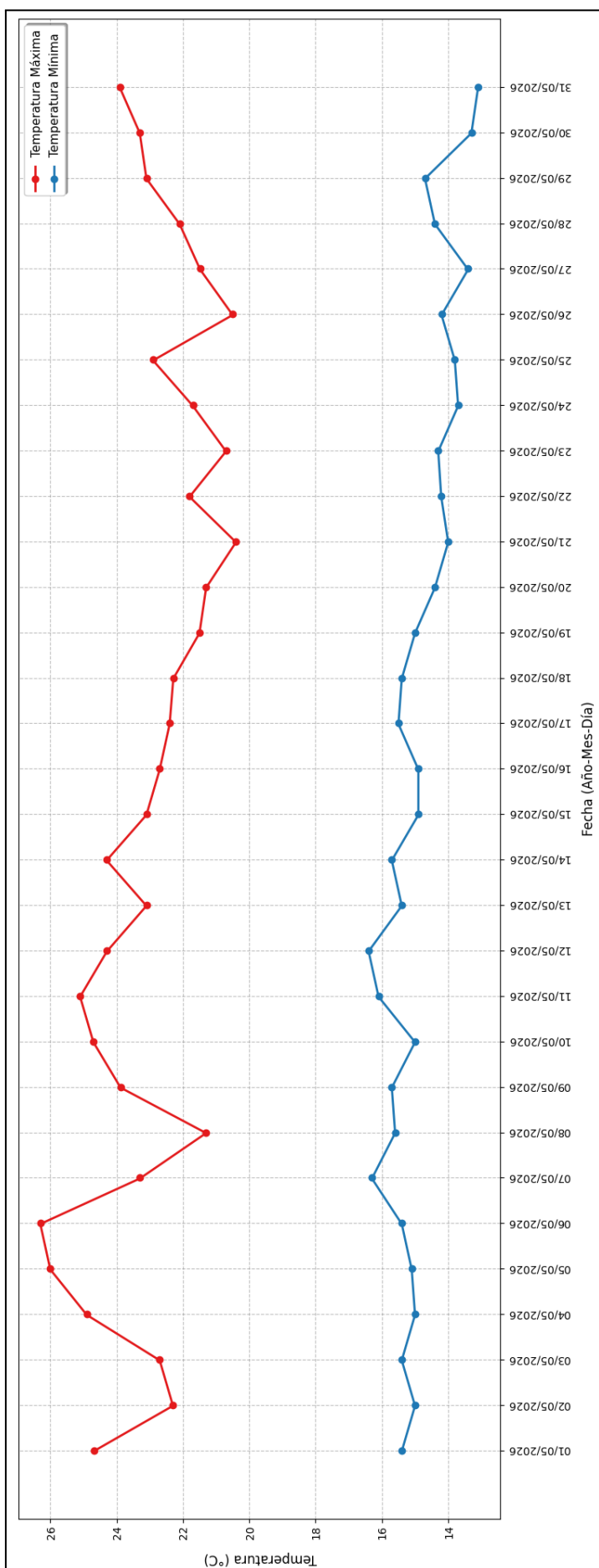


Figura 09: Gráfico de evolución de temperaturas máximas y mínimas diarias en el mes de mayo registradas con sensor DHT22

B. Estadísticos descriptivos de humedad con sensor DHT22

Tabla 07: Medidas de tendencia central de los valores de humedad en sensor DHT22

Media	77.82 %
Mediana	77.85 %
Moda	100.00 %

Tabla 08: Medidas de dispersión de los valores de humedad en sensor DHT22

Mínimo absoluto	51.21 %
Máximo absoluto	100.00 %
Varianza muestral	90.77
Desviación Estándar	9.53 %

Tabla 09: Cuantiles y comportamiento de los valores de humedad en sensor DHT22

Cuartil 1 (Q1 – 25%)	70.09 %
Cuartil 3 (Q3 – 75%)	85.62 %
Rango Intercuartílico (IQR)	15.53 %

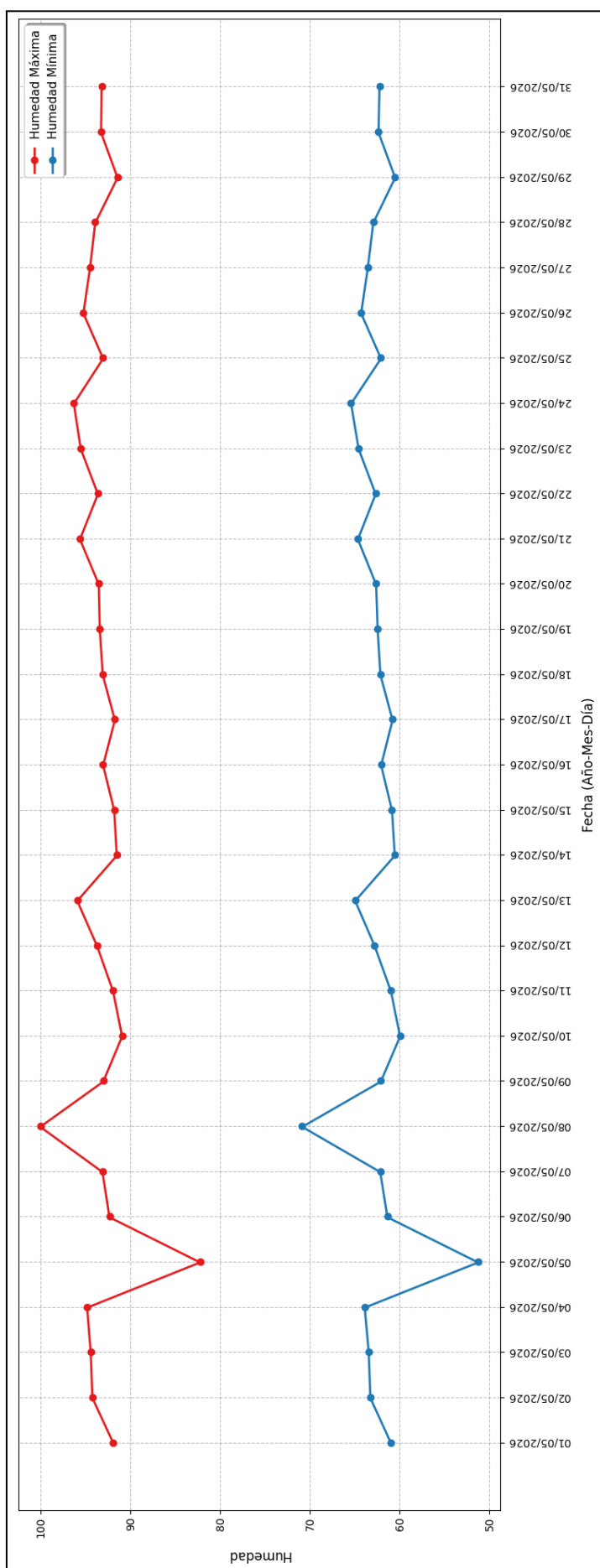


Figura 10: Gráfico de evolución de máximas y mínimas diarias de humedad en el mes de mayo registradas con sensor DHT22

C. Estadísticos descriptivos de temperatura con sensor DHT11

Tabla 10: Medidas de tendencia central de los valores de temperatura en sensor DHT11

Media	18.91 °C
Mediana	18.79 °C
Moda	17.56 °C

Tabla 11: Medidas de dispersión de los valores de temperatura en sensor DHT11

Mínimo absoluto	10.98 °C
Máximo absoluto	28.60 °C
Varianza muestral	9.98 °C
Desviación Estándar	3.16 °C

Tabla 12: Cuantiles y comportamiento de los valores de temperatura en sensor DHT11

Cuartil 1 (Q1 – 25%)	16.45 °C
Cuartil 3 (Q3 – 75%)	21.30 °C
Rango Intercuartílico (IQR)	4.85 °C

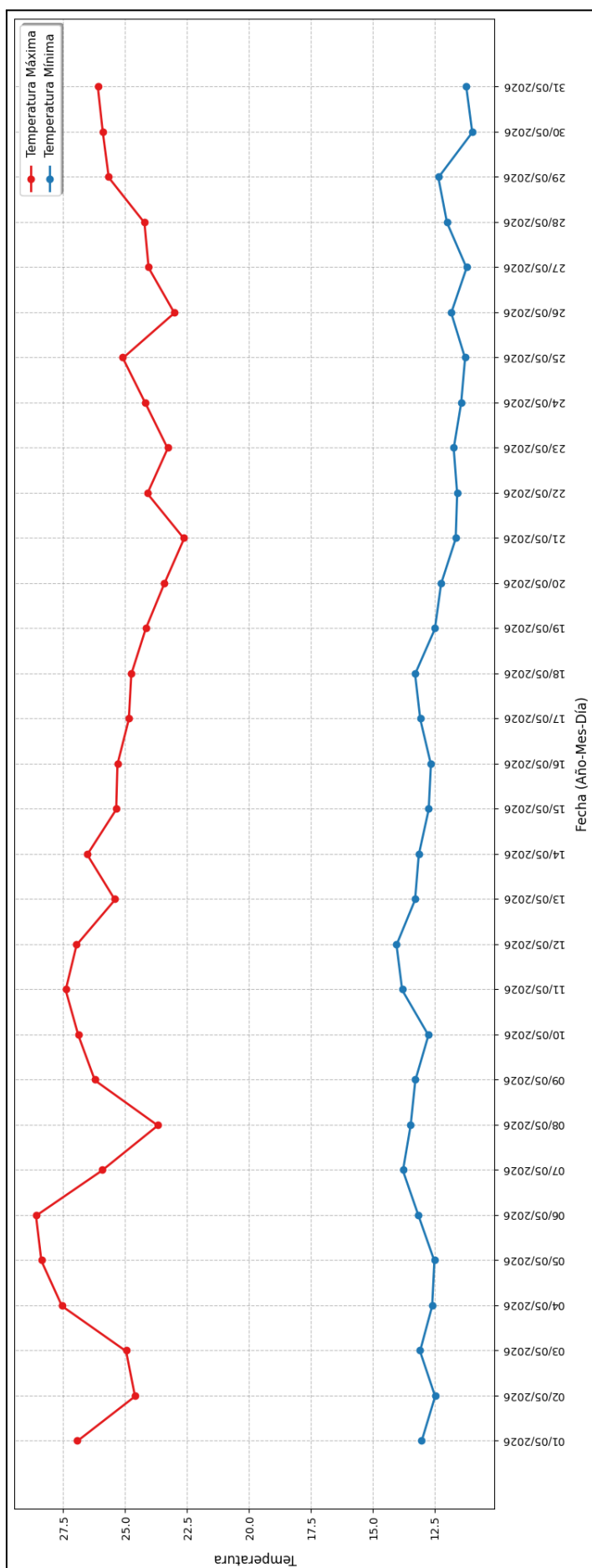


Figura 11: Gráfico de evolución de máximas y mínimas diarias de temperatura en el mes de mayo registradas con sensor DHT11

D. Estadísticos descriptivos de humedad con sensor DHT11

Tabla 13: Medidas de tendencia central de los valores de humedad en sensor DHT11

Media	77.82 %
Mediana	77.92 %
Moda	100.00 %

Tabla 14: Medidas de dispersión de los valores de humedad en sensor DHT11

Mínimo absoluto	48.29 %
Máximo absoluto	100.00 %
Varianza muestral	112.94
Desviación Estándar	13.66 %

Tabla 15: Cuantiles y comportamiento de los valores de humedad en sensor DHT11

Cuartil 1 (Q1 – 25%)	70.65 %
Cuartil 3 (Q3 – 75%)	85.01 %
Rango Intercuartílico (IQR)	14.36 %

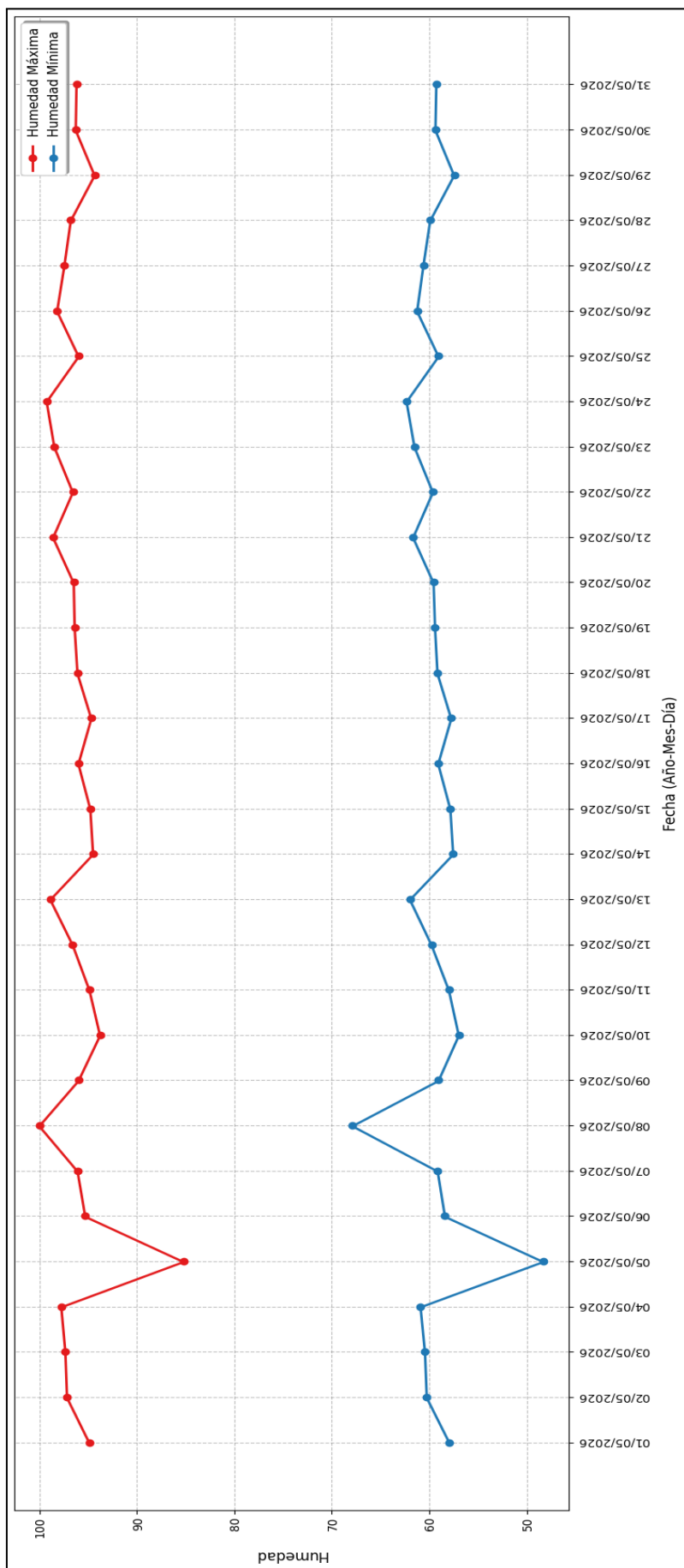


Figura 12: Gráfico de evolución de máximas y mínimas diarias de humedad en el mes de mayo registradas con sensor DHT11

4.2.2.2. ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN Y VALIDACIÓN

i.TEMPERATURA

A-i. TEMPERATURA MÁXIMA - DATA SENAMHI VS DATA SENSOR DHT22

Tabla 16: Resultados de validación en temperatura máxima con sensor DHT22

Coeficiente de Pearson (r)	0.9999935553796764
Coeficiente de Determinación (R^2)	0.9999871108008859
Error Absoluto Medio (MAE)	0.29774193548387096
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	0.2977929568698533
Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE %)	1.3193654296764425

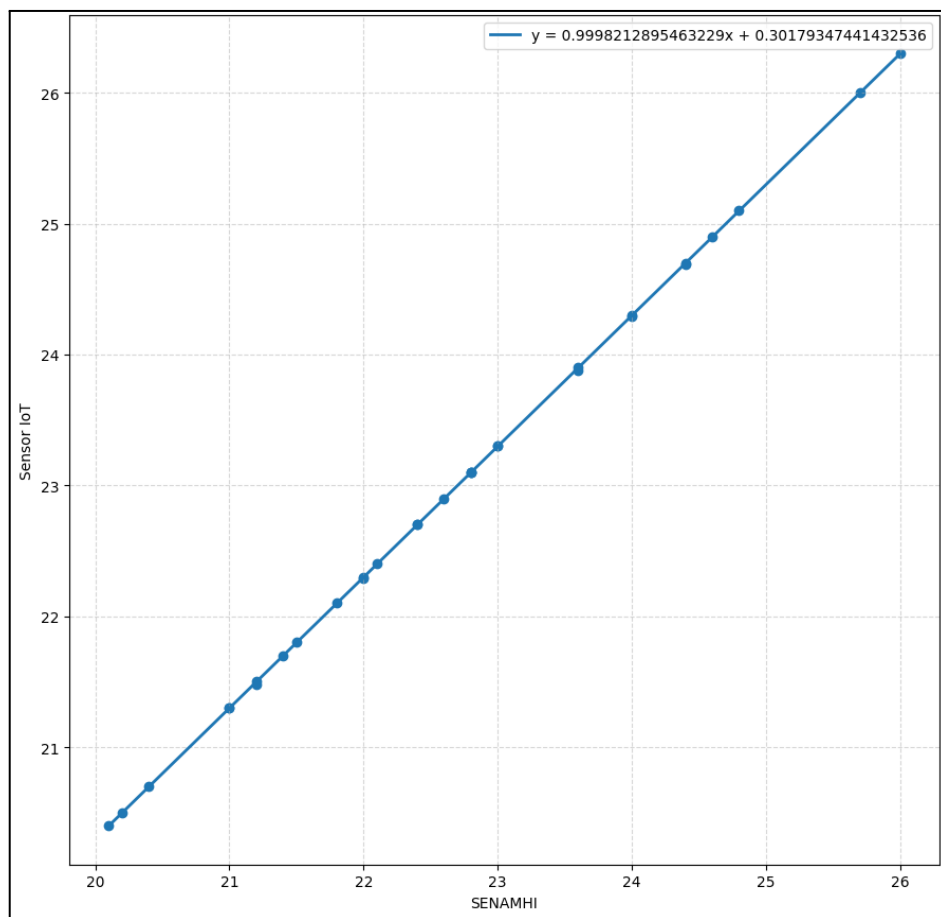


Figura 13: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT22 vs SENAMHI

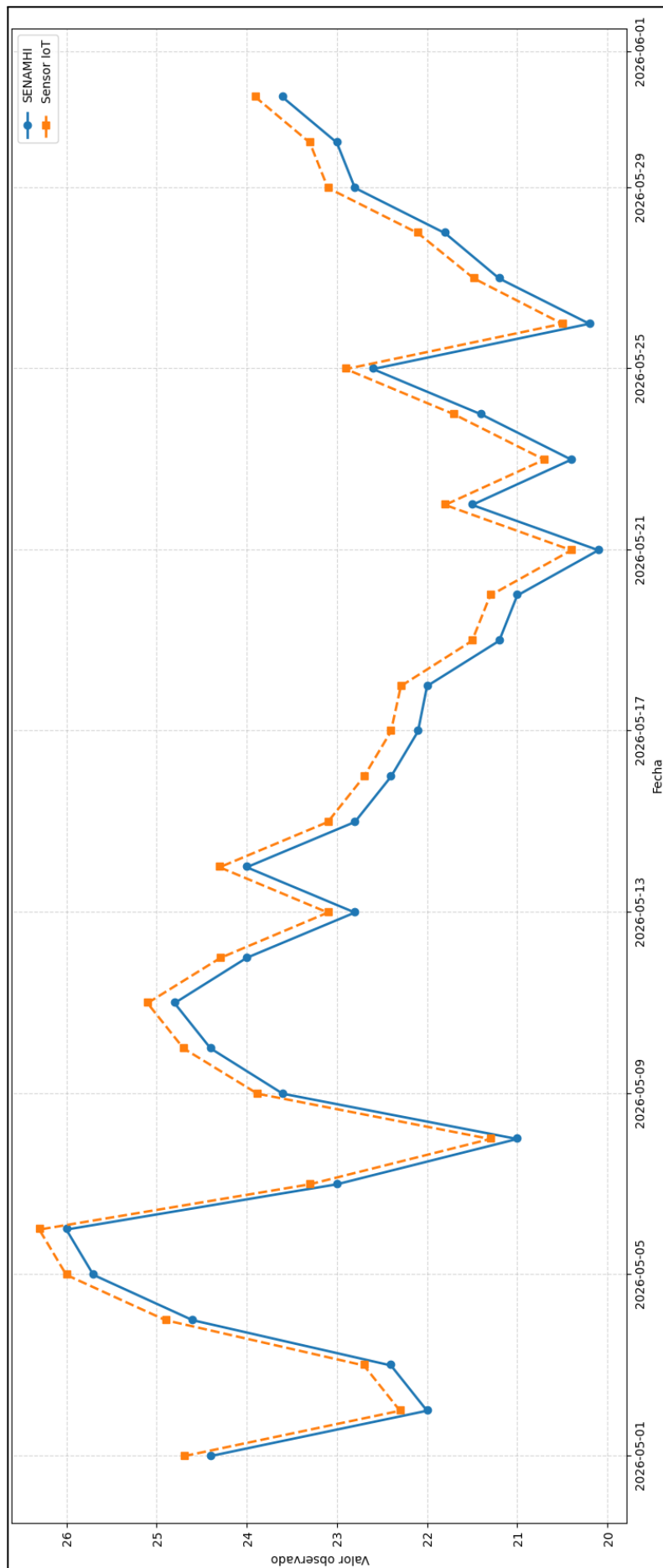


Figura 14: Gráfico comparativo de valores máximos entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 22

B-i. TEMPERATURA MÍNIMA - DATA SENAMHI VS DATA SENSOR DHT22

Tabla 17: Resultados de validación en temperatura mínima con sensor DHT22

Coeficiente de Pearson (r)	0.9999978871451978
Coeficiente de Determinación (R ²)	0.9999957742948598
Error Absoluto Medio (MAE)	0.2996774193548385
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	0.29968262782376076
Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE %)	1.9828841814993823

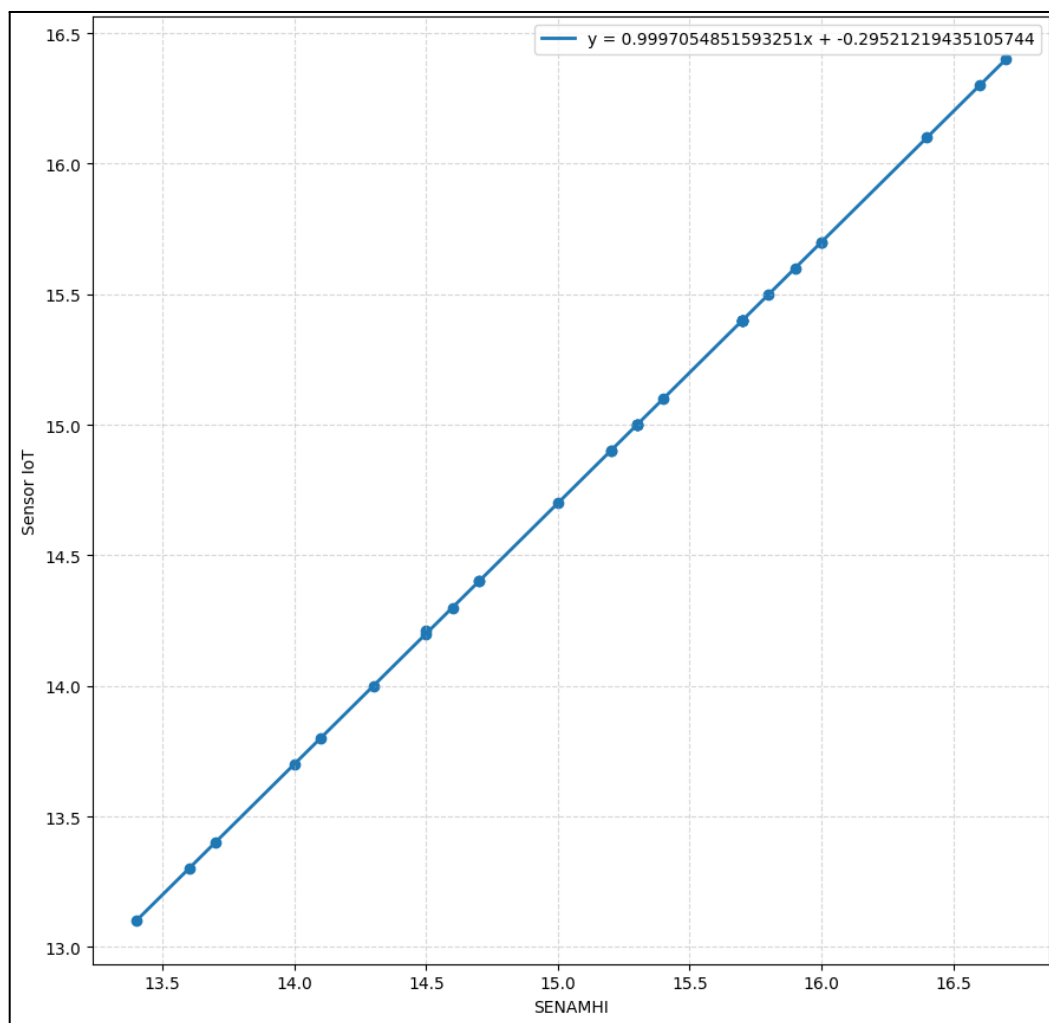


Figura 15: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT22 vs SENAMHI

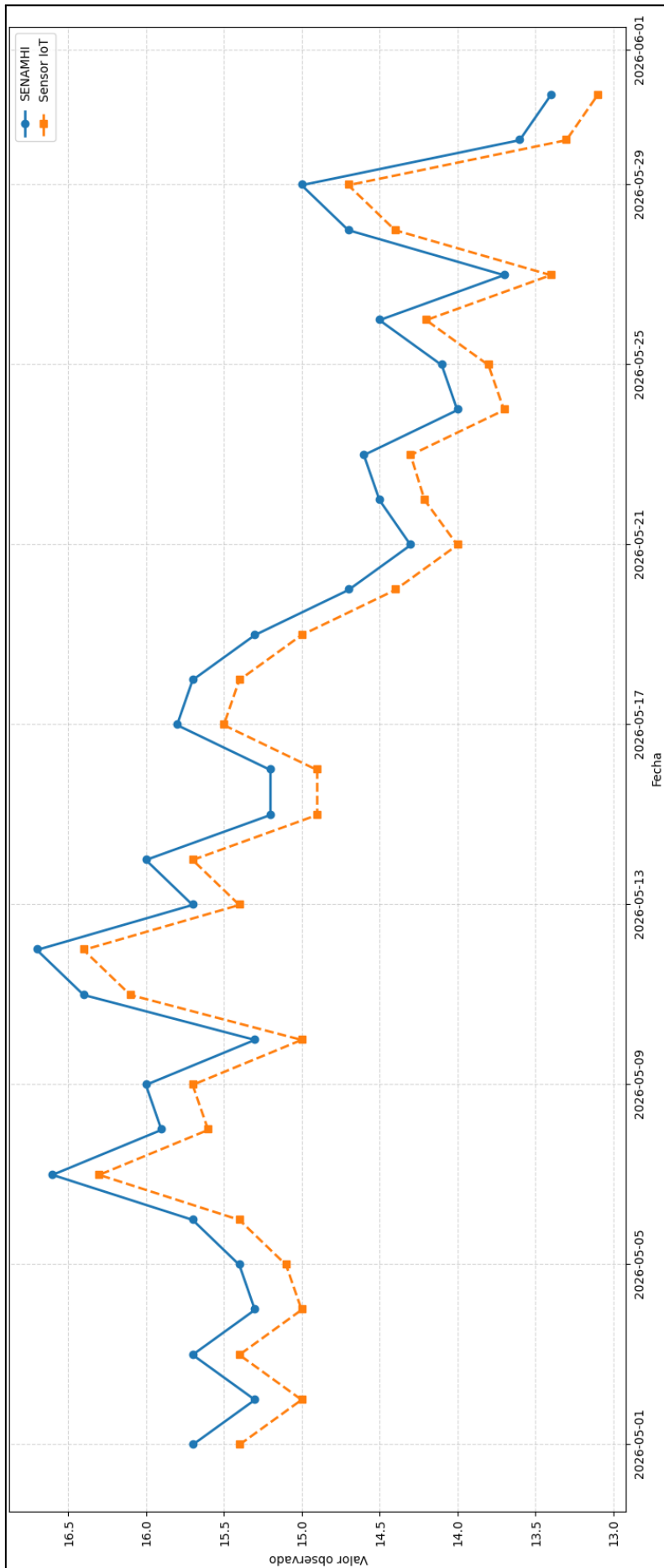


Figura 16: Gráfico comparativo de valores mínimos entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 22

C-i. TEMPERATURA MÁXIMA - DATA SENAMHI VS DATA SENSOR DHT11

Tabla 18: Resultados de validación en temperatura mínima con sensor DHT11

Coeficiente de Pearson (r)	0.9937567231836391
Coeficiente de Determinación (R ²)	0.9875524248726838
Error Absoluto Medio (MAE)	2.6883870967741945
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	2.693828071243478
Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE %)	11.917031150174545

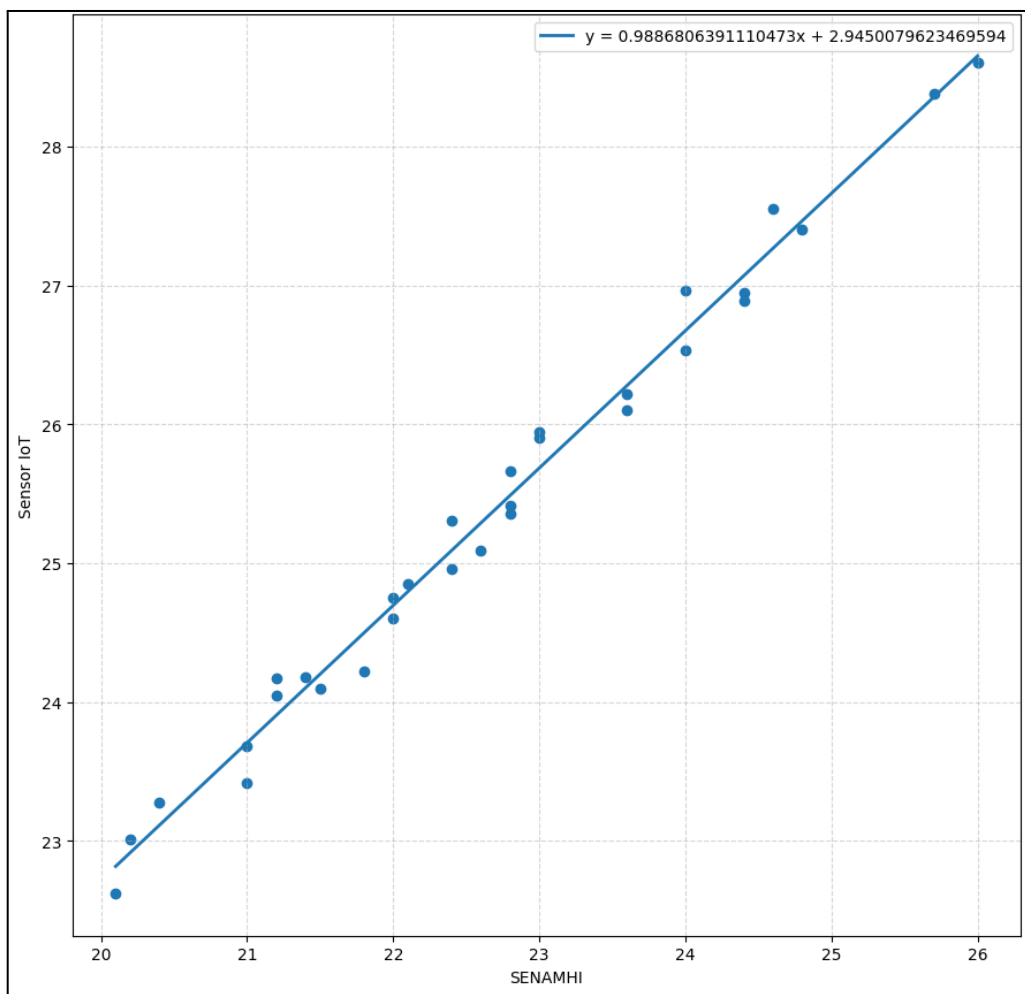


Figura 17: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT11 vs SENAMHI

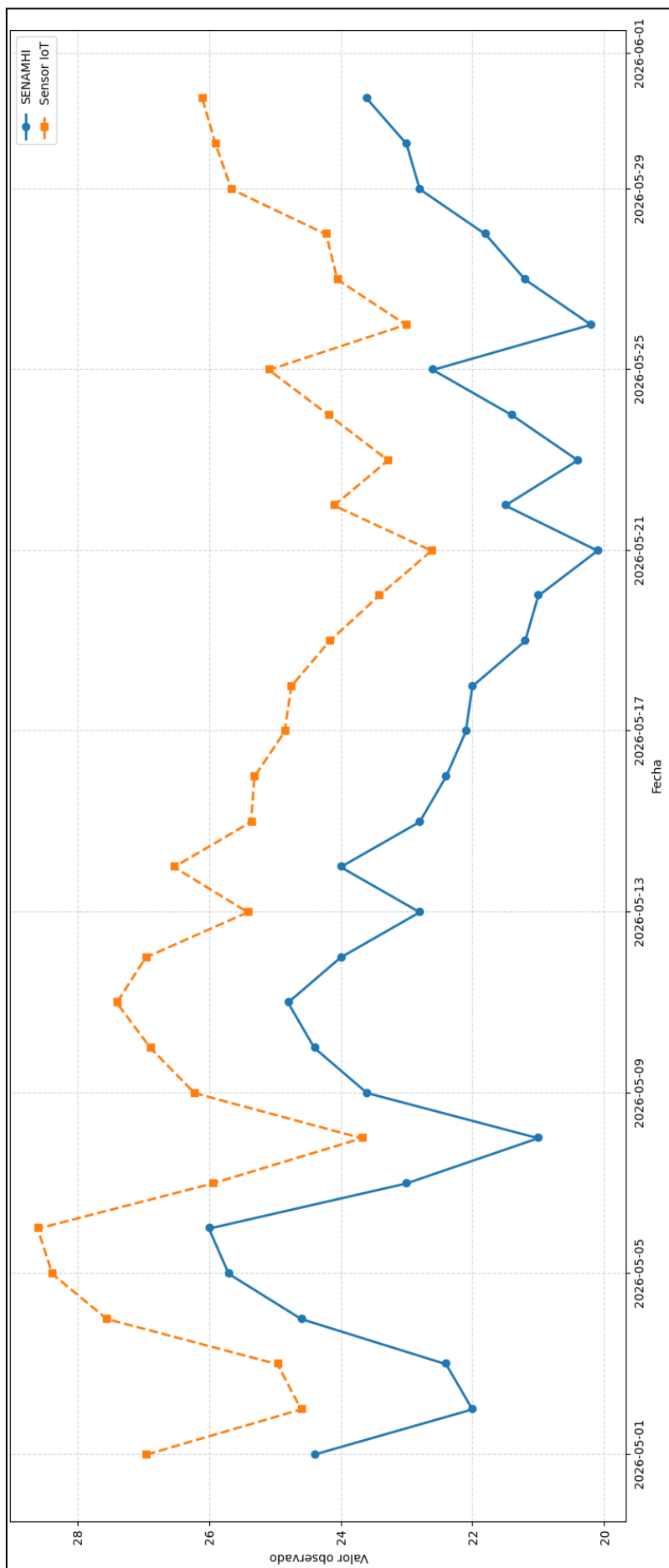


Figura 18: Gráfico comparativo de valores máximos de temperatura entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 11

D-i. TEMPERATURA MÍNIMA - DATA SENAMHI VS DATA SENSOR DHT11

Tabla 19: Resultados de validación en temperatura mínima con sensor DHT11

Coeficiente de Pearson (r)	0.9804211399318465
Coeficiente de Determinación (R ²)	0.9612256116252614
Error Absoluto Medio (MAE)	2.639677419354839
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	2.644992225124252
Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE %)	17.4538769546439

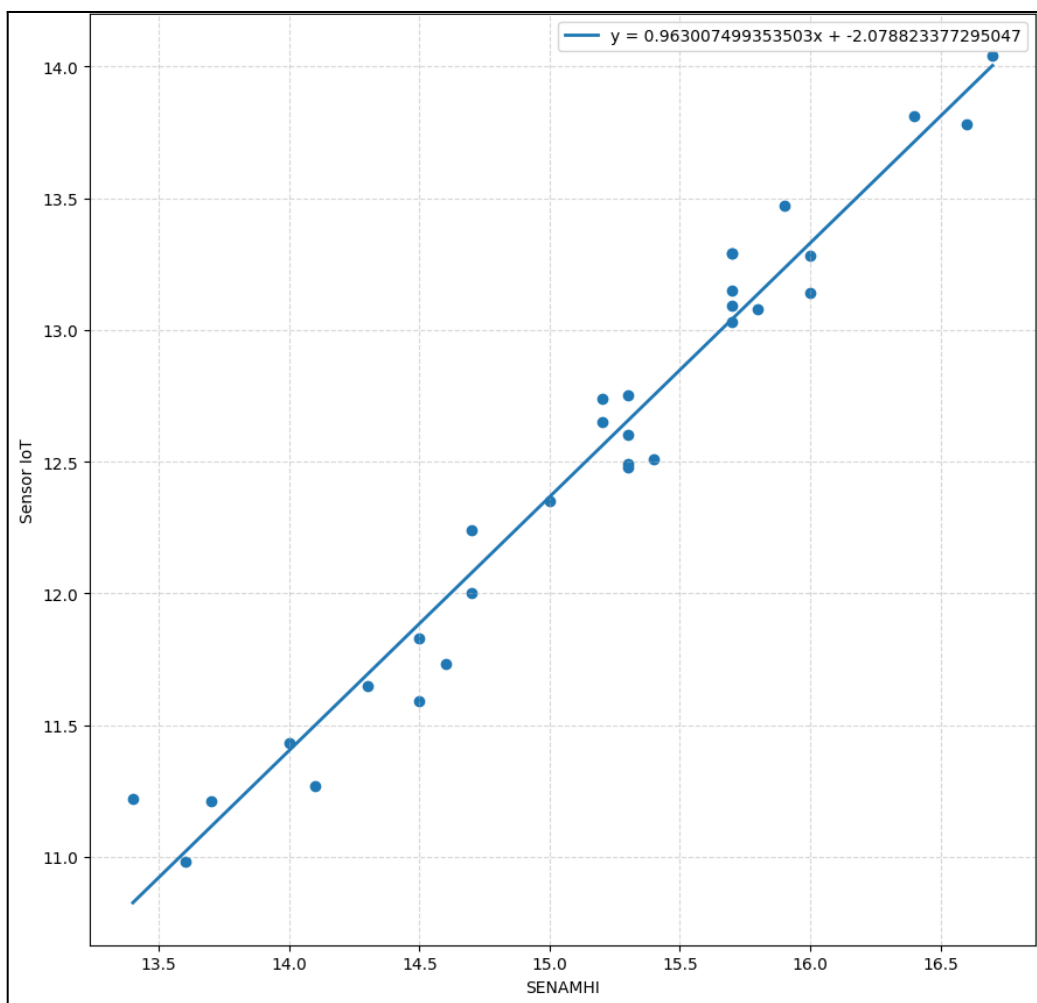


Figura 19: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT11 vs SENAMHI

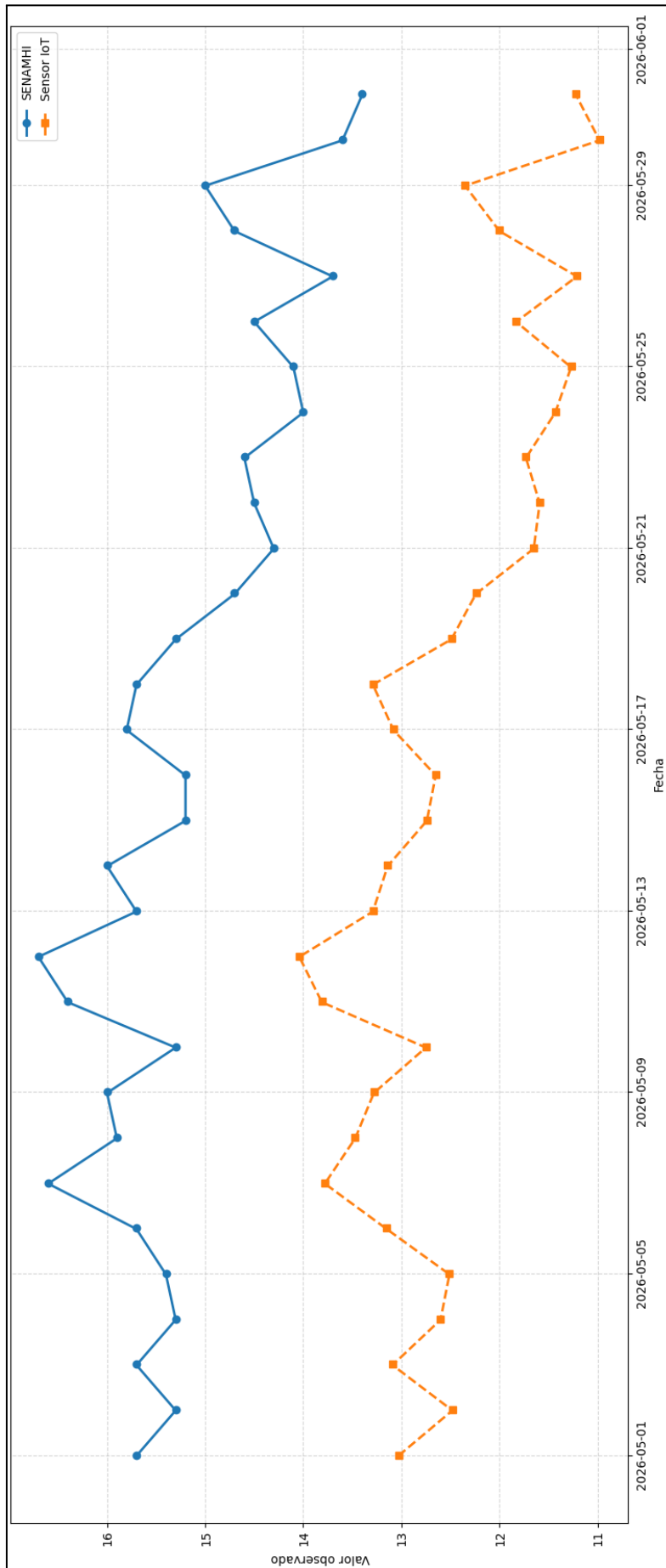


Figura 20: Gráfico comparativo de valores mínimos de temperatura entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 11

ii. HUMEDAD

A-i. HUMEDAD RELATIVA- DATA SENAMHI VS DATA SENSOR DHT22

Tabla 20: Resultados de validación en humedad relativa con sensor DHT22

Coefficiente de Pearson (r)	0.9997686307530155
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.9995373150377594
Error Absoluto Medio (MAE)	0.05451612903225845
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	0.06557438524302
Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE %)	0.07014658775935227

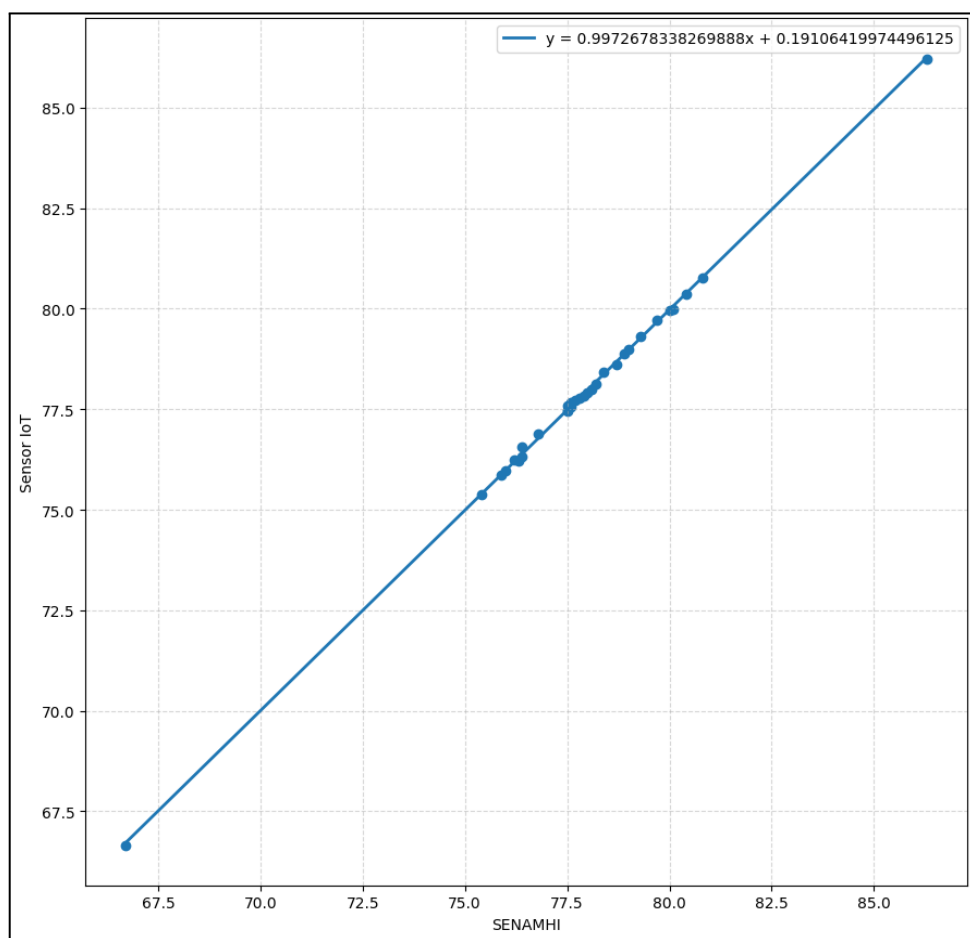


Figura 21: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT22 vs SENAMHI

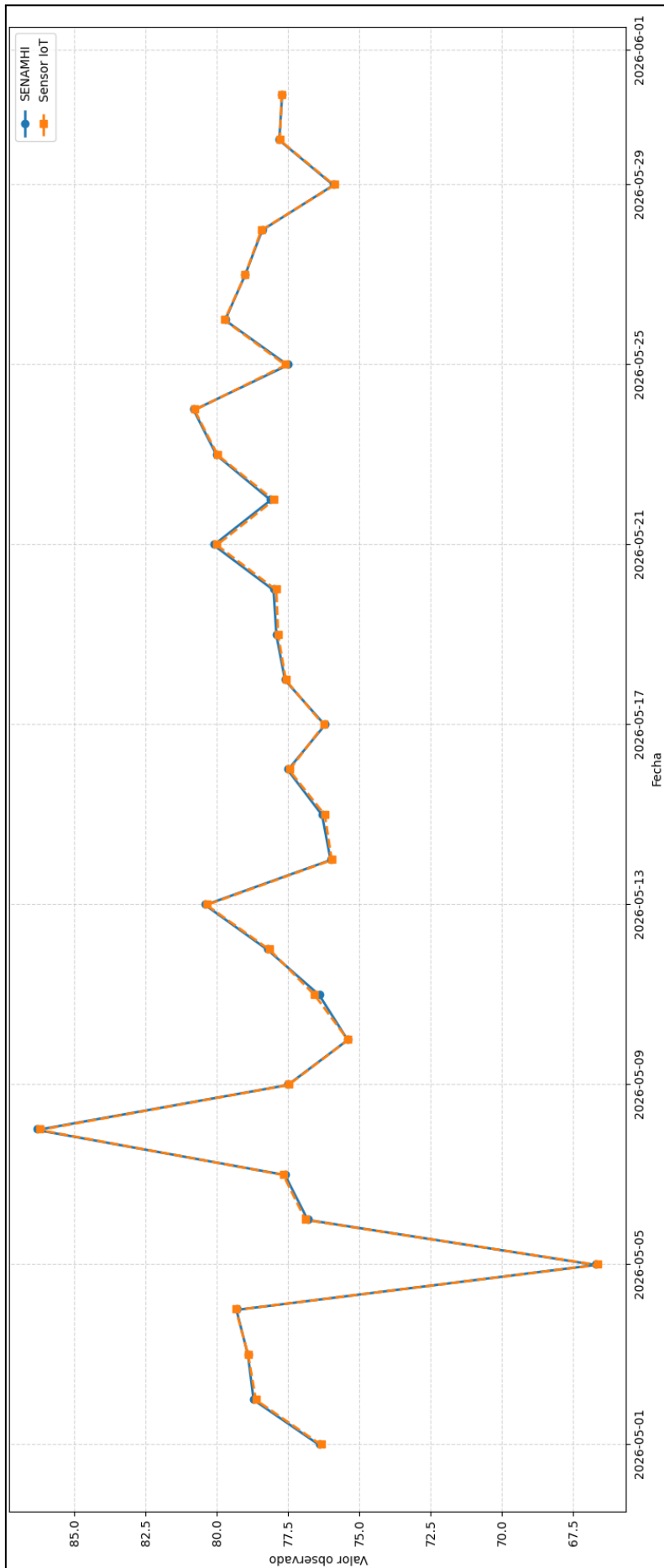


Figura 22: Gráfico comparativo de valores de humedad relativo entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 22

B-i. HUMEDAD RELATIVA - DATA SENAMHI VS DATA SENSOR DHT11

Tabla 21: Resultados de validación en humedad relativa con sensor DHT11

Coeficiente de Pearson (r)	0.9594608725019385
Coeficiente de Determinación (R ²)	0.920565165862181
Error Absoluto Medio (MAE)	18.30709677419355
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	18.32643868400813
Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE %)	23.571614261859782

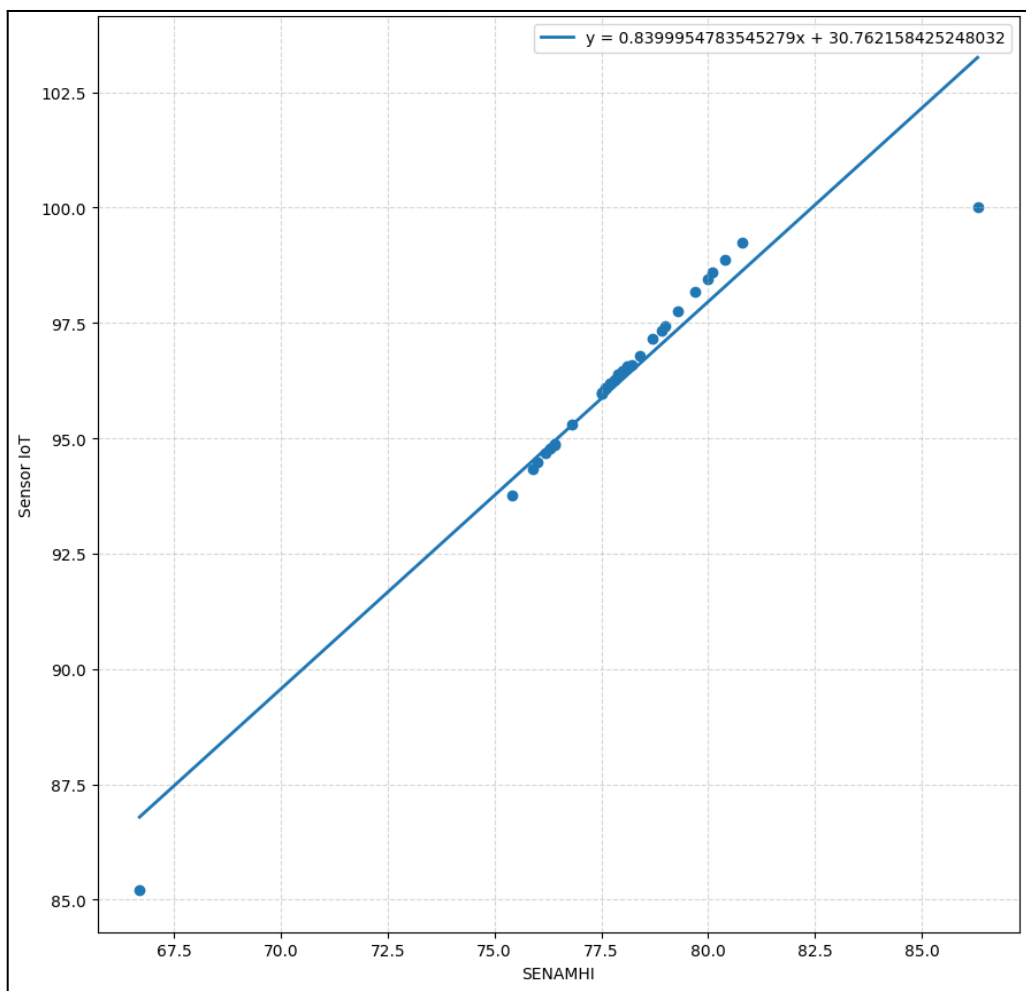


Figura 23: Diagrama de dispersión de datos entre sensor DHT11 vs SENAMHI

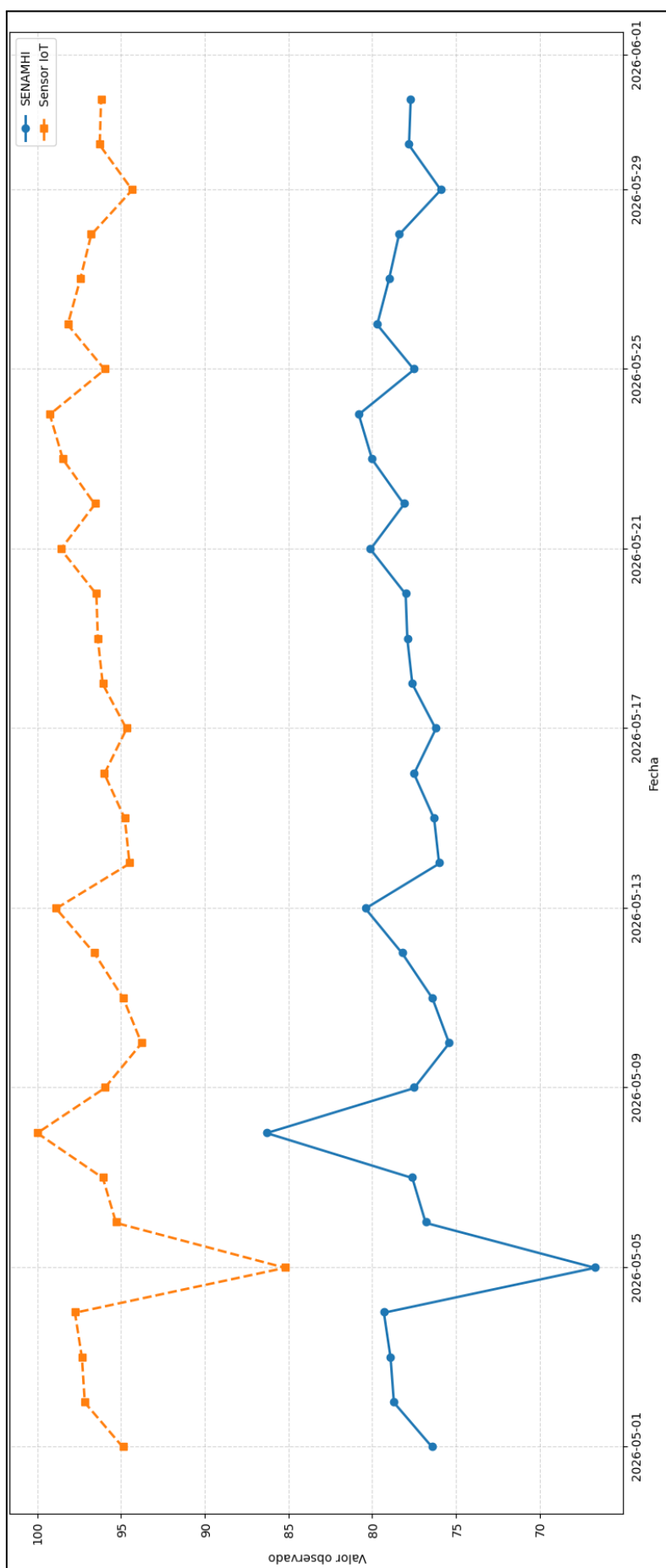


Figura 24: Gráfico comparativo de valores de humedad relativa entre estación meteorológica SENAMHI y sensor DHT 11

4.2.3. INTERPRETACIÓN TÉCNICA

I. DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS

A - I. Estadísticos descriptivos de temperatura y humedad con sensor DHT22

Los resultados descriptivos del sensor DHT22 mostraron que durante el periodo de monitoreo la temperatura presentó una media de 18.92 °C, una mediana de 18.81 °C y una moda de 15.80 °C, lo que indica que los registros se concentraron alrededor de los 19 °C, manteniendo una distribución relativamente estable. Asimismo, la desviación estándar de 2.87 °C evidenció una variabilidad moderada de la temperatura a lo largo del mes de estudio. El rango de valores registrados estuvo comprendido entre 13.10 °C y 26.30 °C, representando adecuadamente las condiciones ambientales observadas durante el periodo evaluado.

En la Figura 9 se observó que las temperaturas máximas y mínimas diarias siguieron una tendencia uniforme durante todo el mes de mayo, sin presentar fluctuaciones abruptas ni comportamientos atípicos. Este comportamiento demostró la capacidad del sensor DHT22 para registrar de manera continua las variaciones térmicas del ambiente.

Respecto a la humedad relativa, el sensor DHT22 registró una media de 77.82 %, una mediana de 77.85 % y una moda de 100 %, evidenciando condiciones atmosféricas predominantemente húmedas durante el periodo de monitoreo. La desviación estándar de 9.53 % indicó una dispersión moderada de los datos, mientras que los valores mínimo y máximo de 51.21 % y 100 %, respectivamente, mostró que el sensor fue capaz de captar un amplio rango de condiciones de humedad ambiental.

En la Figura 10 se aprecia que la humedad relativa presentó variaciones diarias coherentes con el comportamiento meteorológico esperado, manteniendo una tendencia estable y sin interrupciones significativas en la adquisición de datos, lo que demuestra un adecuado desempeño operativo del sensor DHT22.

B - I. Estadísticos descriptivos de temperatura y humedad con sensor DHT11

Los resultados obtenidos con el sensor DHT11 mostraron una temperatura media de 18.91 °C y una mediana de 18.79 °C, valores muy similares a los obtenidos con el

DHT22. Sin embargo, la desviación estándar fue de 3.16 °C, ligeramente superior a la registrada por el DHT22, indicando una mayor dispersión de los datos. Asimismo, el rango de temperaturas registrado se extendió desde 10.98 °C hasta 28.60 °C, reflejando una variabilidad más amplia en las mediciones.

En la Figura 11 se observó que el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas sigue la tendencia general esperada para el periodo evaluado; sin embargo, se evidenciaron mayores fluctuaciones respecto al sensor DHT22, lo cual podría asociarse a una menor precisión instrumental.

Para la humedad relativa, el sensor DHT11 registró una media de 77.82 % y una mediana de 77.92 %, similares a las observadas en el DHT22. No obstante, la desviación estándar alcanzó 13.66 %, superior a la del DHT22, indicando una mayor dispersión y menor estabilidad en las mediciones de humedad.

En la Figura 12 se apreció que la evolución de la humedad mantiene la tendencia general del comportamiento atmosférico observado; sin embargo, las fluctuaciones registradas son más pronunciadas, evidenciando una menor consistencia de las mediciones en comparación con el sensor DHT22.

II. DE LOS ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN Y VALIDACIÓN

A - II. DE LA TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DEL SENSOR DHT22 vs SENAMHI

Los resultados de validación para temperatura máxima mostraron un coeficiente de correlación de Pearson de 0.99999 y un coeficiente de determinación de 0.99998, valores que indican una correlación prácticamente perfecta entre los registros del sensor DHT22 y los datos de referencia del SENAMHI. Asimismo, el error absoluto medio de 0.30°C y un MAPE de 1.32% evidencian diferencias mínimas entre ambas fuentes de información.

En el diagrama de dispersión **Figura 13**, los puntos se encontraron prácticamente alineados sobre la recta de ajuste, confirmando una relación lineal extremadamente fuerte entre ambas mediciones. Por su parte, el gráfico comparativo **Figura 14** mostró una superposición casi total de las curvas, demostrando que el sensor reproduce con gran exactitud las temperaturas máximas registradas por la estación meteorológica.

Para la temperatura mínima, el coeficiente de correlación alcanzó 0.99999 y el R^2 fue de 0.99999, mientras que el MAE fue cercano a 0.30°C . Estos resultados confirmaron que el sensor DHT22 mantiene una precisión muy elevada tanto para temperaturas máximas como mínimas.

En las **Figuras 15 y 16** se observó una coincidencia prácticamente total entre los datos del DHT22 y los registros del SENAMHI, lo que demostró una excelente capacidad del sensor para representar las condiciones térmicas reales del entorno.

B - II. DE LA HUMEDAD DEL SENSOR DHT22 vs SENAMHI

La comparación de los valores de humedad relativa entre el sensor DHT22 y la estación meteorológica del SENAMHI presentó un coeficiente de Pearson de 0.99977 y un coeficiente de determinación de 0.99954, evidenciando una relación lineal extremadamente fuerte entre ambas fuentes de datos. Además, el error absoluto medio fue de apenas 0.05% y el error porcentual medio absoluto fue de 0.07%, valores que representan diferencias prácticamente despreciables.

En el diagrama de dispersión **Figura 21** se observó que los datos se concentran alrededor de la línea de ajuste, mientras que en el gráfico comparativo **Figura 22** las curvas del DHT22 y del SENAMHI presentan una superposición casi completa. Esto demostró que el sensor DHT22 reproduce con alta fidelidad las condiciones reales de humedad atmosférica.

C - II. DE LA TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DEL SENSOR DHT11 vs SENAMHI

Para la temperatura máxima, el sensor DHT11 obtuvo un coeficiente de correlación de 0.99376 y un R^2 de 0.98755, indicando una correlación fuerte con los registros del SENAMHI. Sin embargo, el error absoluto medio alcanzó 2.69°C y el MAPE fue de 11.92%, valores significativamente superiores a los obtenidos por el DHT22.

En las **Figuras 17 y 18** se apreció que, aunque el sensor sigue adecuadamente la tendencia general de las temperaturas registradas por el SENAMHI, existieron diferencias apreciables en la magnitud de las mediciones, lo que evidencia una menor exactitud.

Para la temperatura mínima, el coeficiente de correlación fue de 0.98042 y el R^2 alcanzó 0.96123, confirmando una relación fuerte pero inferior a la observada con el DHT22. Asimismo, el error absoluto medio fue de 2.64°C y el MAPE alcanzó 17.45%, indicando desviaciones importantes respecto a los valores de referencia.

Los gráficos de las **Figuras 19 y 20** muestran que el sensor DHT11 sigue la tendencia general de las temperaturas mínimas; sin embargo, presenta discrepancias más notorias respecto a la estación meteorológica, afectando su precisión para aplicaciones que requieren alta exactitud.

D - II. DE LA HUMEDAD DEL SENSOR DHT11 vs SENAMHI

La comparación de humedad relativa entre el sensor DHT11 y el SENAMHI presentó un coeficiente de correlación de 0.95946 y un R^2 de 0.92057, valores que indicaron una relación positiva fuerte. Sin embargo, el error absoluto medio alcanzó 18.31% y el MAPE fue de 23.57%, evidenciando diferencias considerables entre ambos conjuntos de datos.

En el diagrama de dispersión **Figura 23** se observó una mayor dispersión de los puntos alrededor de la línea de ajuste, mientras que en el gráfico comparativo **Figura 24** las curvas presentan diferencias notables en diversos periodos del monitoreo. Esto indica que, aunque el DHT11 es capaz de identificar la tendencia general de la humedad relativa, su exactitud resulta insuficiente para aplicaciones que requieran mediciones de alta confiabilidad.

E - II. RESUMEN DE ERRORES Y COMPARATIVA

Los resultados obtenidos evidencian que el sensor DHT22 presentó el mejor desempeño en todas las pruebas de validación realizadas. Para temperatura máxima y mínima registró errores absolutos medios cercanos a 0.30°C y errores porcentuales inferiores al 2%, mientras que para humedad relativa los errores fueron prácticamente nulos.

Por el contrario, el sensor DHT11 presentó errores considerablemente mayores, especialmente en humedad relativa, donde el MAE superó el 18% y el MAPE alcanzó el 23.57%. Aunque mantuvo correlaciones altas con los datos del SENAMHI, las diferencias observadas reducen significativamente su exactitud.

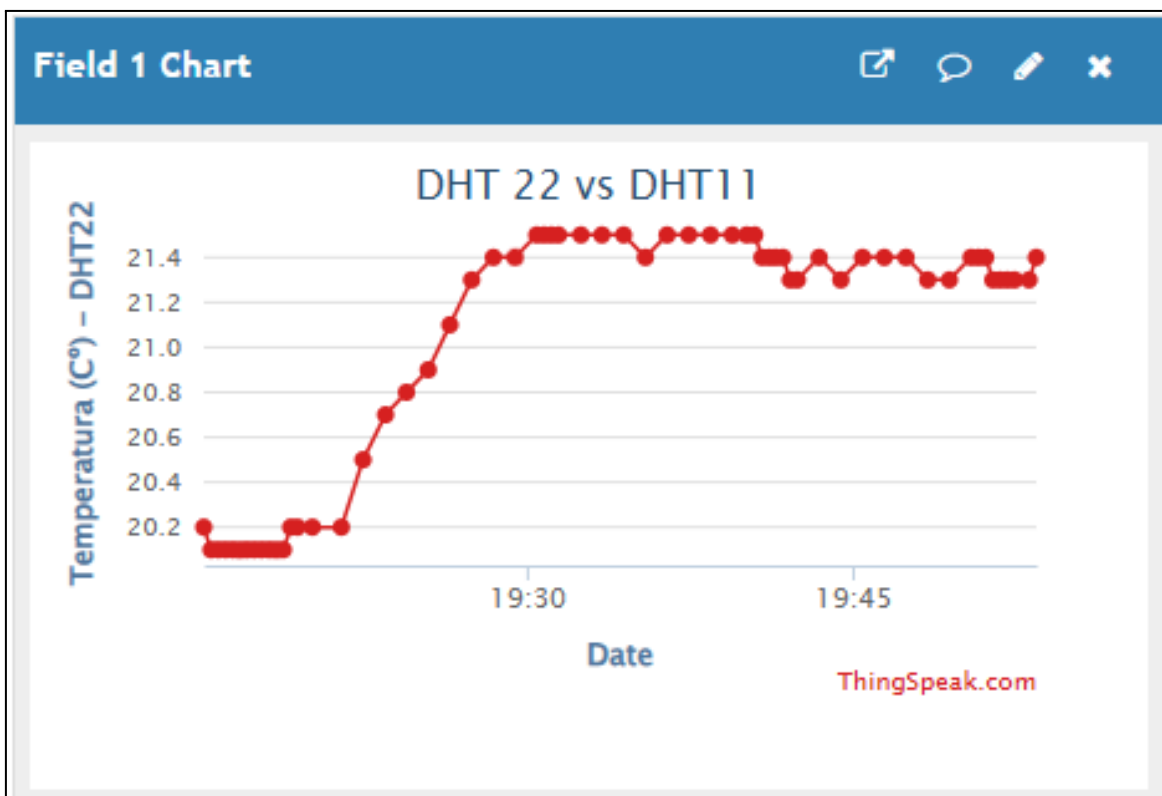
En consecuencia, los resultados demuestran que el sensor DHT22 posee una mayor precisión, exactitud y confiabilidad para el monitoreo meteorológico basado en tecnología IoT, constituyéndose como la alternativa más adecuada para aplicaciones de seguimiento de temperatura y humedad en comparación con el sensor DHT11.

4.3. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 02

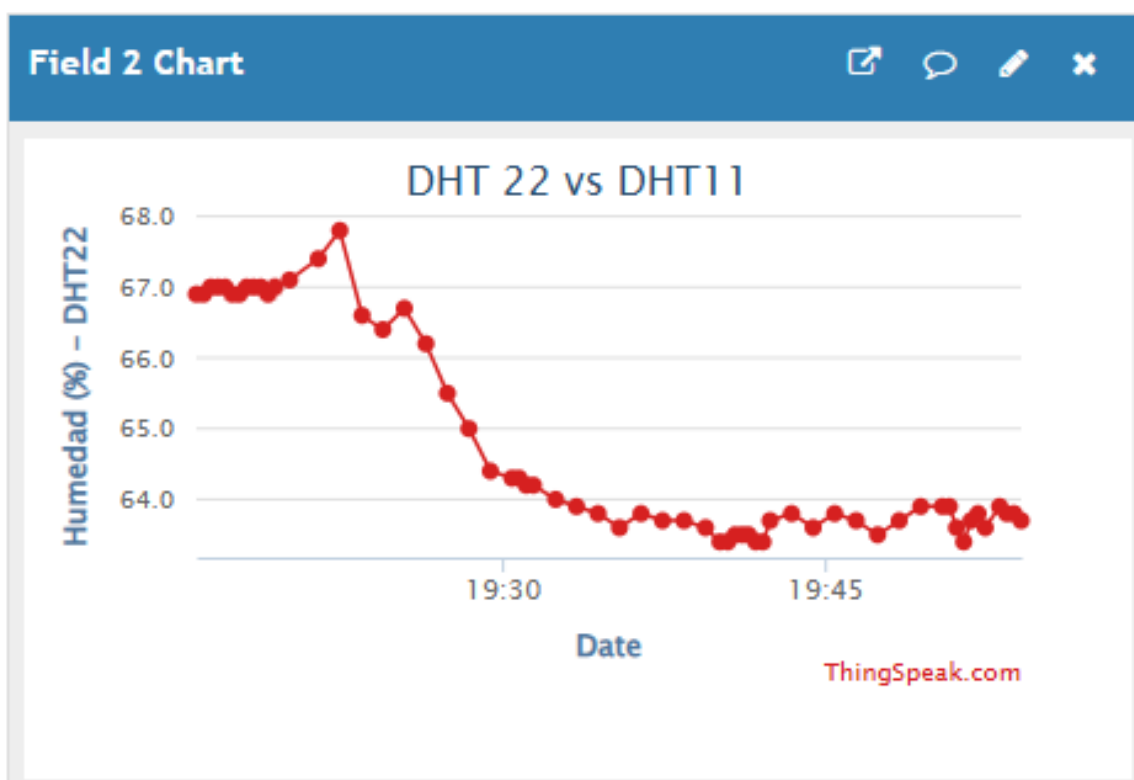
Analizar el alcance y la estabilidad de la conexión inalámbrica empleada para la transmisión de los datos meteorológicos desde el punto de captura hasta la plataforma web.

4.3.1. OBSERVACIÓN DE RESULTADOS EN THINGSPEAK

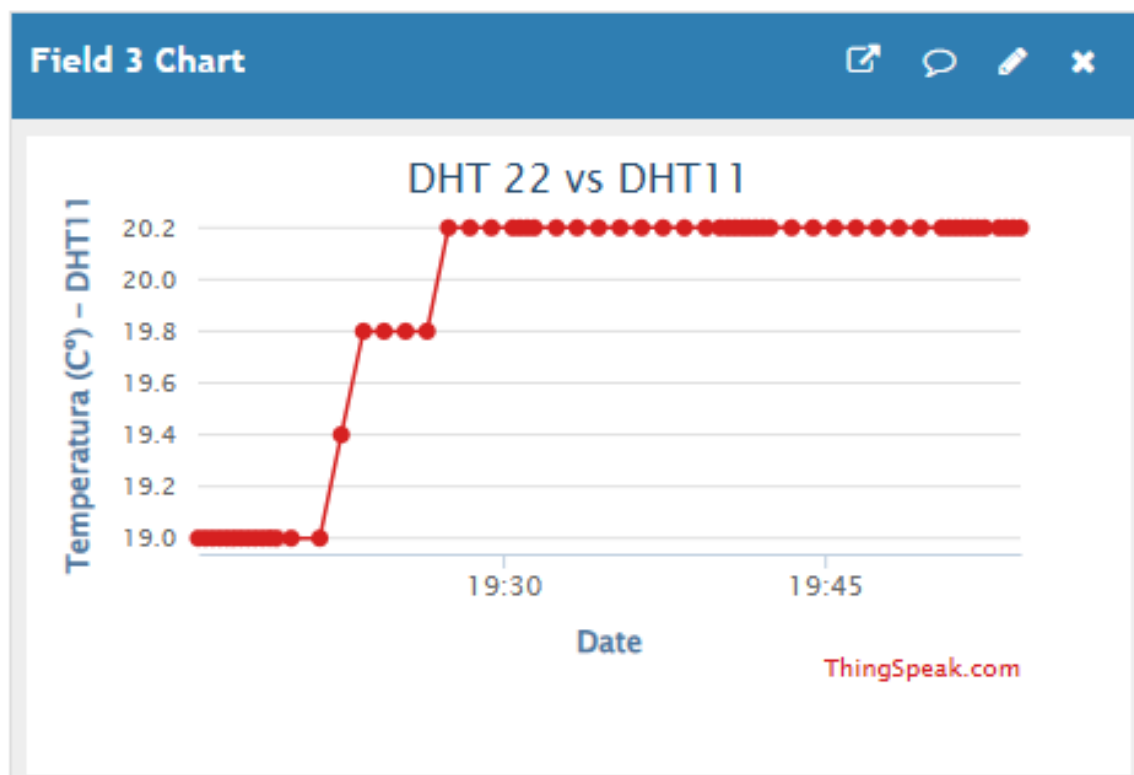
A. OBSERVACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE SENSORES



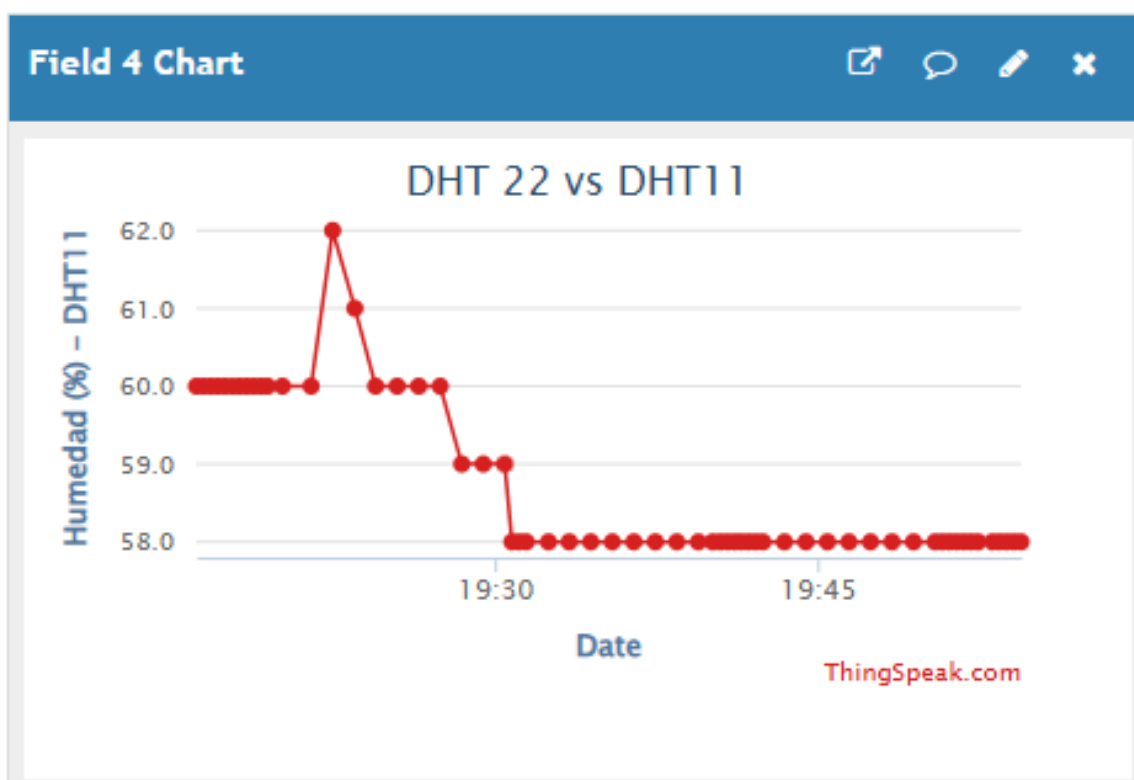
B. OBSERVACIÓN DE HUMEDAD CON SENSOR DHT22



C. OBSERVACIÓN DE TEMPERATURA CON SENSOR DHT11



D. OBSERVACIÓN DE HUMEDAD CON SENSOR DHT22



4.3.2. CONTINUIDAD ININTERRUMPIDA EN CANAL

El canal donde se recopiló la información, tiene un ID: 3237892, el cual tiene un acceso público que puede hallarse en el servidor. La manera de detectar anomalías en la captura, envío y recepción de la data se realizó de manera remota, ya que si la plataforma presentase un desperfecto de algún hardware, placa o sensor, esta mandaría la señal al servidor que dejó de actualizar la data minuto a minuto.

A continuación, se muestra una captura de pantalla del servidor donde se pudo corroborar día tras día desde el 01 de mayo hasta el 31 de mayo la continua e ininterrumpida lectura de datos del sensor de temperatura y humedad DHT22 y DHT11.

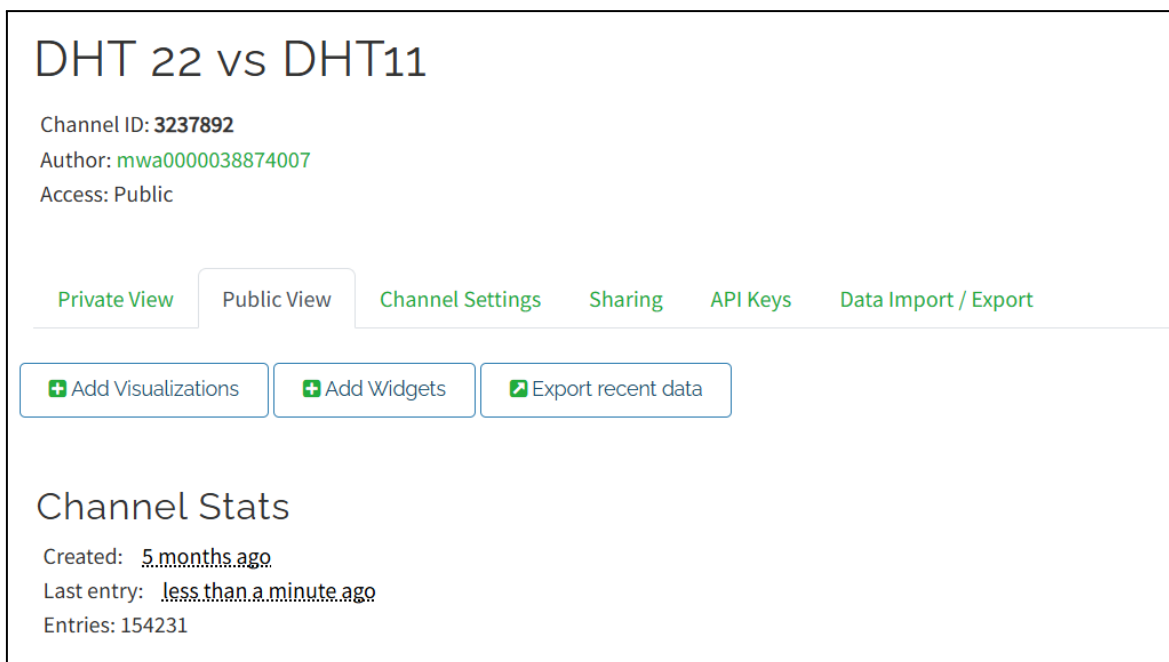


Figura 25: Campo de conformidad de lectura y recepción de data del sensor DHT22 y DHT11

Como se puede ver en la figura anterior, el mensaje “*less than a minute ago*” confirma que el último mensaje fue recibido hace menos de un minuto. También se puede observar que “*Entries*” refleja todos los mensajes recibidos desde que se encendió el sensor hasta el momento de la observación o momento de descarga de data.

4.4. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 03

Verificar la capacidad y continuidad del sistema de alimentación eléctrica propuesto para mantener el equipo IoT operando de forma continua y sin interrupciones.

4.4.1. INSTRUMENTO PROPUESTO

Una semana antes del 01 de mayo se intentó una conexión eléctrica a base de alguna energía renovable y debido a la zona de estudio se propuso conectarla a un panel solar de potencia ordinaria cuyas características son las siguientes:

Tabla 22: Especificaciones técnicas de panel solar propuesto

Voltaje:	$\leq 36 \text{ V}$
Power:	2W
Working Voltage:	5V
Open Circuit Voltage:	6V
Short Circuit Current:	0.4A
Output Voltage:	5V
Max System Voltage:	6V
Largo:	20 cm
Ancho:	10 cm

El sistema tuvo buen desarrollo y la placa respondía bien a la conexión eléctrica, sin embargo, debido al tipo de modelo del panel solar, que no es recargable o no tiene una fuente para almacenar energía para las fases nocturnas, se descartó.

Se consideró también que el plazo de captura de datos era de todo el mes de mayo por lo que se debía priorizar la continuidad del sistema eléctrico, sin embargo, para evaluaciones académicas no se descarta si la evaluación va desde las 7:00 horas hasta las 18:00 horas, ya que se comprobó así de manera empírica.

4.4.2. ALTERNATIVAS

A. PANEL SOLAR RECARGABLE

Como segunda alternativa se consideró un sistema solar autónomo compuesto por panel fotovoltaico, controlador de carga y batería recargable de 12 V. Esta configuración permitiría almacenar energía durante el día y suministrar durante la noche, garantizando la operación continua del sistema. El costo estimado de implementación para un sistema de estas características, considerando un panel solar de 20 W, controlador de carga y batería de almacenamiento, oscila entre S/ 500 y S/ 600, dependiendo de la capacidad de la batería y las características de los componentes seleccionados.

4.4.3. ELECCIÓN VIABLE

La alternativa seleccionada para la alimentación del sistema IoT fue la conexión a la red eléctrica convencional debido a su capacidad para garantizar un suministro energético continuo durante las 24 horas del día. La placa de desarrollo utilizada opera con una tensión de 5 V en corriente continua (DC), por lo que se empleó una fuente de alimentación USB capaz de convertir los 220 V de corriente alterna (AC) de la red eléctrica a los niveles requeridos por el sistema.

Considerando que el consumo energético del conjunto conformado por la placa ESP32 y los sensores DHT22 y DHT11 es inferior a 2 W, una fuente USB estándar de 5 V y 1 A resulta suficiente para su funcionamiento. Asimismo, se identificó que cargadores de teléfono con salida tipo C y que se conectan directamente a una corriente alterna de 220V sirven como fuentes de conexión sin dañar la placa y el sensor y también los equipos de telecomunicaciones cercanos, como módems o routers WiFi, ya que disponen de puertos USB que proporcionan una salida estabilizada de 5 V, permitiendo alimentar el sistema y mantener simultáneamente la conectividad para la transmisión de datos.

Por estas razones, la alimentación mediante red eléctrica convencional fue considerada la opción más viable, al proporcionar estabilidad operativa, bajo consumo energético y continuidad en la adquisición de datos durante todo el periodo de monitoreo.

Para esta investigación, se utilizó un módem cercano con entrada USB el cual fue conectado con un cable tipo C adaptado de 20 metros para alcanzar la zona de monitoreo.

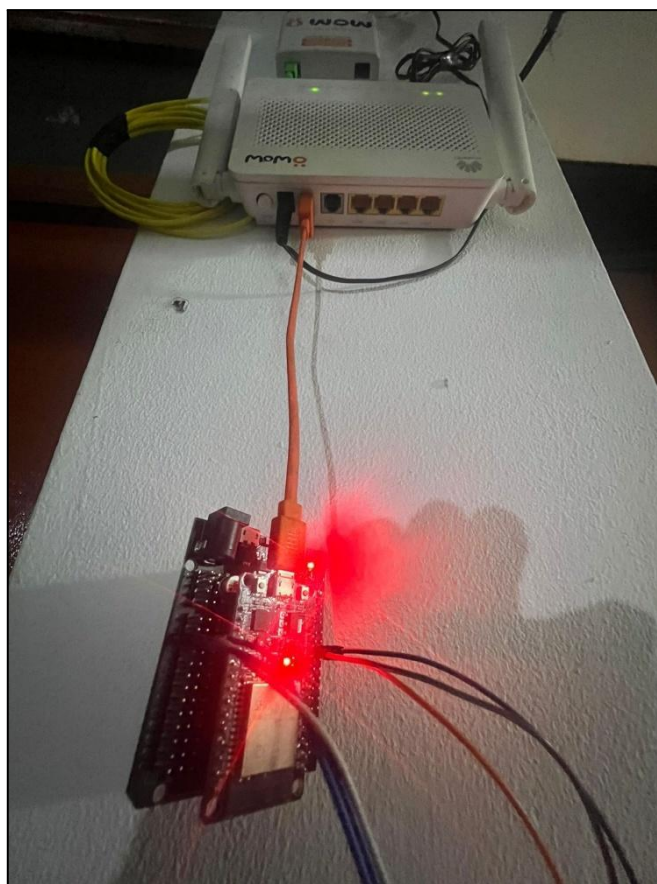


Figura 26: Imagen referencial de conexión entre placa y sensor con módem de conexión permanente

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

PRIMERA: Se concluye que la implementación de la tecnología IoT para el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad en la región de Tacna es técnicamente viable, siempre que esté sujeta a una rigurosa selección de los componentes de hardware. El ecosistema basado en la placa ESP32 y el servidor ThingSpeak demostró una arquitectura robusta para automatizar la captura, procesamiento y almacenamiento de los datos temporales climatológicos, posicionándose como una alternativa de bajo costo y alta disponibilidad metodológicamente apta para complementar los sistemas de monitoreo ambiental convencionales.

SEGUNDA: Respecto a la instrumentación seleccionada, se determinó que el sensor DHT22 posee una precisión y exactitud óptimas para fines científicos, registrando un Coeficiente de Determinación (R^2) superior al 99.9% tanto en temperatura como en humedad, y un Error Absoluto Medio (MAE) sumamente bajo de apenas 0.30 °C y 0.05% respectivamente frente a la estación convencional del SENAMHI. Por el contrario, el sensor DHT11 demostró no ser técnicamente viable para aplicaciones de alta fidelidad, debido a que exhibió desvíos críticos y errores sistemáticos pronunciados, reflejados en un MAE de 18.31% en humedad relativa y un error porcentual (MAPE) de hasta 17.45% en temperatura mínima.

TERCERA: El análisis de la infraestructura de telecomunicaciones determinó que la conexión inalámbrica mediante la interfaz nativa Wi-Fi de la placa ESP32 y el protocolo HTTP POST hacia ThingSpeak garantiza un alcance de cobertura adecuado y una estabilidad operativa óptima. La conformidad de lectura fue ratificada por el estado de actualización permanente del servidor ("less than a minute ago") y el respaldo masivo de

todos los registros temporales ininterrumpidos a lo largo de la campaña de medición, demostrando la fiabilidad del canal para la transferencia dinámica de datos meteorológicos sin pérdidas significativas en el enlace.

CUARTA: Se verificó que el sistema de alimentación eléctrica basado en un panel solar directo de 2W carece de viabilidad para regímenes continuos de 24 horas debido a la ausencia de un circuito de regulación y batería recargable para las fases nocturnas. Por consiguiente, para asegurar la continuidad analítica del mes de mayo se validó como la única alternativa viable la energización cableada continua de 5V estabilizada a través de una conexión eléctrica continua como la que proviene de los tomacorriente a través de un dispositivo de carga de 5V externo o del puerto USB de un módem local. No obstante, el esquema de energía renovable fotovoltaica directa quedó validado de forma empírica como técnicamente apto exclusivamente para proyectos académicos con un régimen de operación diurno acotado entre las 07:00 y las 18:00 horas.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda al Ministerio del Ambiente del Perú - MINAM, que impulse la realización de investigaciones, la ejecución de programas piloto y proyectos que experimenten y pongan en práctica tecnologías asociadas al Internet de las Cosas (IoT) para que puedan captar parámetros ambientales y meteorológicos en el país. Apostar por estas iniciativas contribuiría a comprobar la viabilidad técnica de estas tecnologías en las diferentes condiciones geográficas y climáticas que existen en el país, a fomentar la generación de información en tiempo real, complementando así los sistemas de monitoreo tradicionales y facilitar la toma de decisiones referentes a la gestión ambiental, la prevención de riesgos o la adaptación al cambio climático.

SEGUNDA: A la comunidad académica nacional, proponer el desarrollo de experimentaciones que guíen la evaluación, la implementación y la comparación de nuevas plataformas de hardware-técnicas de recopilación y transmisión de información meteorológica a partir de las cuales se pueda analizar el desempeño en precio, fiabilidad, consumo, procesamiento, comunicación de los datos y así se pueda abordar la búsqueda de alternativas para optimizar los sistemas de monitoreo medioambiental por IoT o bien para reforzar el conocimiento que se propone en las distintas condiciones climáticas en el país.

TERCERA: Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI vislumbrar la posibilidad de realizar el desarrollo de un servidor o plataforma de tipo oficial que pueda complementar la data meteorológica para la recepción y visualización de datos provenientes de estaciones meteorológicas que se basen en tecnología IoT que haga uso de sensores como el DHT22. En esta investigación, el sensor mencionado dio

lugar a un bajo margen de error en sus mediciones de temperatura y de humedad respecto de la estación de referencia, por lo que su utilización podría dar lugar a la expansión de la cobertura espacial para el monitoreo meteorológico, tener información más situada en áreas de interés y generar que haya nuevos desarrollos respecto a investigaciones científicas en lo que respecta a las condiciones meteorológicas en diversas partes del país.

CUARTA: A los estudiantes y egresados de la Universidad Privada San Carlos, proyectar el diseño y la fabricación de una carcasa personalizada utilizando tecnología de impresión 3D. Esta estructura debe dimensionarse para adecuarse al volumen del microcontrolador ESP32 y los sensores, integrando un compartimento estanco que permita impermeabilizar por completo las zonas de conexión eléctrica, resguardando así los componentes electrónicos contra la intemperie, el polvo y las precipitaciones pluviales en la zona de evaluación o climas adversos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aosong Electronics Co., Ltd. (2023). AM2302/DHT22 temperature and humidity sensor specification. <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>
- Aosong Electronics Co., Ltd. (2023). DHT11 temperature and humidity sensor technical data sheet. <https://www.digikey.com/en/htmldatasheets/production/1801488/0/0/1/dht11-manual.html>
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Buelvas, J., Múnera, D., Tobón V., D. P., Aguirre, J., & Gaviria, N. (2023). Data quality in IoT-based air quality monitoring systems: A systematic mapping study. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(4), Article 248. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06127-9>
- Camargo, L., Medina, B., & Gómez, J. (2022). Prototipo electrónico IoT para el seguimiento de variables ambientales. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 13(2). <https://doi.org/10.24054/raaas.v13i2.2723>
- Ciza, P. (2022). IoT Based System for Monitoring and Control Data Center Temperature [Tesis de maestría, Nelson Mandela African Institution of Science and Technology]. Repositorio Institucional NM-AIST. <https://www.semanticscholar.org/paper/IoT-based-system-for-monitoring-and-control-data-at-Ciza/43ce0b5b3a8fcc1f808a563dfd9b2693ee6f45d8>
- Coila Ticona, C. A. (2024). Diseño de una arquitectura basada en internet de las cosas para la optimización de la calidad del suelo y ambiente de los jardines del distrito de Puno [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21314>
- Congreso de la República del Perú. (2000). Ley N.º 27336, Ley de Desarrollo de las Funciones y Facultades del OSIPTEL. *Diario Oficial El Peruano*. <https://www.osiptel.gob.pe/media/kh4jio5z/ley-27336.pdf>

Congreso de la República del Perú. (2005). Ley N.° 28611, Ley General del Ambiente.

Diario Oficial El Peruano.

<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>

Congreso de la República del Perú. (2018). Ley N.° 30754, Ley Marco sobre Cambio

Climático. Diario Oficial El Peruano.

https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wpcontent/uploads/sites/127/2018/12/LMCC_ESPA%C3%91OL.pdf

De la Cruz Caiza, J. E. (2024). Desarrollo de una red de sensores distribuida IOT para

sistema meteorológico [Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS.

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/31026>

Endesa. (2024). Diferencias entre corriente alterna y corriente continua. Endesa.

<https://www.endesa.com/es/la-cara-e/red-electrica/energia-eletrica-tipologias-aplicaciones>

Espressif Systems. (2025). ESP32 series datasheet.

<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>

Huarachi, J. C., & Calcina, D. (2024). Sistema de monitoreo en tiempo real de los

parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible [Proyecto de titulación, Universidad Nacional del Altiplano].

Repositorio Institucional UNAP.

<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/23639>

Iglesias Cabello, J. (2025). Design and Implementation of an IoT Weather Station [Tesis

de licenciatura, Novia University of Applied Sciences]. Repositorio Institucional Theseus. <https://doi.org/10.1109/IBSSC56953.2022.10037309>

International Energy Agency. (2024). Solar PV.

<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>

- International Organization for Standardization. (2015). ISO 9001:2015 Quality management systems—Requirements. ISO.
<https://www.iso.org/standard/62085.html>
- International Organization for Standardization. (2018). ISO/IEC 30141:2018 Internet of Things (IoT)—Reference architecture. ISO.
<https://www.iso.org/standard/65695.html>
- International Telecommunication Union. (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/facts-figures-2023/>
- Julca Espinoza, M. A., & Olivera Flores, J. L. (2023). Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica con tecnología Arduino para la Universidad Nacional de Jaén [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. <https://hdl.handle.net/20.500.14689/904>
- Kodali, R. K., y Sahu, A. (2016). *An IoT based weather information prototype using WeMos*. 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I). <https://doi.org/10.1109/IC3I.2016.7917997>
- Mamani Cansaya, R. (2024). Sistema de monitoreo en IoT para medir la contaminación en el lago Titicaca, Puno 2023 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP.
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22275>
- Mamun, M. A. A., & Yuce, M. R. (2019). Sensors and systems for wearable environmental monitoring toward IoT-enabled applications: A review. *IEEE Sensors Journal*, 19(18), 7771–7788. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2919352>
- Melo, J. C., Torres, R. S., Araújo, L. M., Brito, A. V., & Barboza, E. A. (2021). A low-cost IoT system for real-time monitoring of climatic variables and photovoltaic generation for smart grid application. *Sensors*, 21(14), 4810. <https://doi.org/10.3390/s21093293>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Ministerio del Ambiente.

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones>

Ministerio del Ambiente. (2019). Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. Diario Oficial El Peruano.

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>

Ministerio del Ambiente. (2021). Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI. Diario Oficial El Peruano.
<https://www.gob.pe/institucion/senamhi/normas-legales/2136839-027-2021-minam>

Ministerio del Ambiente. (2022). Glosario de términos ambientales. Ministerio del Ambiente.
<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/504.pdf>

Nguyen, T. (2021). Smart Weather Station [Proyecto de titulación, Universidad de Ciencias Aplicadas de Vaasa]. Repositorio Institucional Theseus.
<https://www.theseus.fi/handle/10024/510303?show=full>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Status of the world's soil resources. FAO. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>

Pinares Mamani, G. H. (2025). Implementación de un Sistema de Monitoreo Ambiental en Tiempo Real con ESP32 y Evaluación Comparativa de Middlewares para la Gestión de Dispositivos IoT en Instituciones Educativas [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <https://hdl.handle.net/20.500.12773/20616>

Ramírez Escobar, F. A. (2023). Diseño de un sistema de monitoreo IoT para mejorar la productividad del agricultor en el poblado de Cuchuchin-Sayan, 2023 [Tesis de

- licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional UNJFSC. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/8782>
- Ricaldi Cerdan, J. L. (2023). Implementación de una estación meteorológica aplicando IOT en los Humedales de Ventanilla – Callao [Proyecto de investigación de licenciatura, Universidad de Ciencias y Humanidades]. Repositorio Institucional UCH. <http://hdl.handle.net/20.500.12872/808>
- Romero Molano, A. M., & Orduz Pérez, J. F. (2022). Implementación de un sistema IoT de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en El Salvador. *Revista de Ingeniería*, (34), 45–56. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09975>
- Salgado Villanueva, M., Choque, R., Flores, J., & Mamani, G. (2025). Desarrollo de una estación IoT para monitoreo de microclimas y condiciones de suelo para adaptación de cultivos al cambio climático. *Ingeniería Investiga*, 7(1), 12–25. <https://doi.org/10.47796/ing.v7i00.1167>
- Sánchez Cuevas, J. L., Guerrero Castillo, M. M., Mona Peña, L. J., Sánchez Jácome, O., & Velasco Pacheco, A. E. (2023). Monitoreo de temperatura y humedad ambiental con LoRaWAN: IoT en el desafío energético y el cambio climático. *Revista IPSUMTEC*, 6(5). <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i5.215>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2023). *Memoria institucional 2023*. <https://www.gob.pe/senamhi>
- Shrestha, S. (2025). Smart, Portable IoT Weather Station with Seismic Activity Detection [Tesis de licenciatura, Centria University of Applied Sciences]. Repositorio Institucional Theseus. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2026051913443>
- Talavera, J. M., Tobón, L. E., Gómez, J. A., Culman, M. A., Aranda, J. M., Parra, D. T., Quiroz, L. A., & Hoyos, A. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>
- Ullo, S. L., & Sinha, G. R. (2020). Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, 20(11), 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>

- Vallejo-Sanchez, D., Muñoz-García, A., Chaverra-Zuleta, E., Correa-Casas, J., Londoño, L. F., & Bustamante-Rúa, O. (2024). Desarrollo de una arquitectura IoT para monitoreo ambiental: Integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. *DYNA*, 91(231), 163–168. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n231.112093>
- World Meteorological Organization. (2023). *State of the Global Climate 2023*. <https://library.wmo.int/>
- Yilmaz, E., Aydin, A., y colaboradores. (2022). *IoT-based smart weather station: Design and performance evaluation*. *Sensors*, 22(19). <https://doi.org/10.3390/s22197336>

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

Título: EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE TECNOLOGÍA IOT PARA EL MONITOREO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EN TEMPERATURA Y HUMEDAD EN TACNA - 2026

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES INDICADORES		METODOLOGÍA
Problema General ¿En qué medida es técnicamente viable la implementación de tecnología IoT para el monitoreo en tiempo real de los parámetros meteorológicos de temperatura y humedad en la región de Tacna - 2026?	Objetivo General Evaluar la viabilidad técnica de la implementación de tecnología IoT para el monitoreo en tiempo real de los parámetros meteorológicos de temperatura y humedad en la región de Tacna - 2026.	Hipótesis General La implementación de tecnología IoT es técnicamente viable para el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad en la región de Tacna - 2026, ofreciendo una alternativa de bajo costo, alta disponibilidad y precisión compatible con los estándares de medición.	Independiente Tecnología IoT aplicada al monitoreo meteorológico	Error absoluto de temperatura (%), Error absoluto de humedad (%)	Enfoque: Cuantitativo Tipo de investigación: Aplicada Nivel de investigación: Descriptivo – Correlacional Método: Método científico, comparativo y estadístico. Técnica de recolección de datos: Observación directa y registro automático de datos.
				Porcentaje de datos transmitidos correctamente, Continuidad de transmisión (%)	
				Porcentaje de datos transmitidos correctamente, Continuidad de transmisión (%)	Instrumentos: Sensor DHT22, sensor DHT11, placa ESP32, plataforma ThingSpeak y registros meteorológicos de referencia
				Tiempo de operación continua (h), Número de interrupciones registradas	
Problemas específicos ¿Qué tan precisos y exactos son los sensores IoT seleccionados para medir la temperatura	Objetivos específicos Determinar la precisión y exactitud de los sensores IoT seleccionados para la medición de	Hipótesis Específicas Los sensores IoT seleccionados presentan un nivel de precisión y exactitud con un margen de error mínimo y aceptable, permitiendo	Dependiente Viabilidad técnica del sistema de monitoreo meteorológico	Grado de concordancia con estación de referencia, Coeficiente de correlación (R)	
				Disponibilidad del sistema (%),	

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES INDICADORES	METODOLOGÍA
y humedad en comparación con los instrumentos tradicionales? ¿Cuál es el alcance y la estabilidad de la conexión inalámbrica para enviar los datos meteorológicos desde el lugar de medición hasta la plataforma web? ¿De qué manera el sistema de alimentación eléctrica propuesto es capaz de mantener el equipo IoT funcionando de forma continua y sin interrupciones?	temperatura y humedad mediante la comparación con instrumentos meteorológicos tradicionales. Analizar el alcance y la estabilidad de la conexión inalámbrica empleada para la transmisión de los datos meteorológicos desde el punto de captura hasta la plataforma web. Verificar la capacidad y continuidad del sistema de alimentación eléctrica propuesto para mantener el equipo IoT operando de forma continua y sin interrupciones.	registros de temperatura y humedad altamente correlacionados con los datos de los instrumentos tradicionales. La conexión inalámbrica empleada garantiza un alcance de cobertura adecuado y una estabilidad óptima para asegurar la transmisión continua de las variables meteorológicas hacia la plataforma web. El sistema de alimentación eléctrica propuesto diseñado en base a la demanda de carga del circuito provee la autonomía energética suficiente para mantener el módulo IoT operando de forma continua, incluso bajo escenarios de baja radiación solar en la zona.	Estabilidad de funcionamiento Cumplimiento de objetivos de monitoreo, Funcionamiento continuo durante el periodo de evaluación	Técnica de análisis de datos: Estadística descriptiva e inferencial Estadísticos empleados: Media, mediana, moda, desviación estándar, coeficiente de correlación de Pearson (r), coeficiente de determinación (R^2), MAE, RMSE y MAPE.

Anexo 02: Panel fotográfico



Figura 27: Cartel de Estación Meteorológica del SENAMHI – UNJBG.



Figura 28: Entrada de Estación Meteorológica del SENAMHI – UNJBG.



Figura 29: Estuche protector de placa ESP32.



Figura 30: Reconocimiento de WiFi de la placa ESP32.



Figura 31: Reconocimiento de conexión eléctrica con panel solar ordinario.



Figura 32: Reconocimiento de encendido de luz roja de la placa ESP32.



Figura 33: Reconocimiento de conexión eléctrica con panel solar ordinario.



Figura 34: Placa ESP32 y sensor de temperatura y humedad.

Anexo 03: Plataforma ThingSpeak en funcionamiento


Channels ▾ Apps ▾ Devices ▾ Support ▾

Commercial Use

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

Add Visualizations Add Widgets Export recent data

MATLAB Analysis MATLAB

Channel Stats

Created: 5 months ago

Last entry: less than a minute ago

Entries: 154231

