

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Sistema de monitoreo con conexión a la nube para la medición de la calidad del aire en la
Urbanización de Palermo del distrito de Trujillo - 2024

Línea de investigación: Sistemas Embebidos

Autores:

Flores Quispe, Carlos Enrique
Tafur Mendez, Walter

Jurado evaluador:

Presidente : Azabache Fernández, Filiberto
Secretario : Alvarado Rodríguez, Luis Enrique
Vocal : Cerna Sánchez, Eduardo Elmer

Asesor:

Alva Alarcón, Jorge Luis

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1288-933X>

Trujillo-Perú

2024

Fecha de Sustentación: 13/09/2024

PROYECTO DE TESIS SISTEMA DE MONITOREO CON CONEXIÓN A LA NUBE PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA URBANIZACIÓN DE PALERMO DEL DISTRITO DE TRUJILLO 2024.docx

por Walter Tafur

Fecha de entrega: 26-jun-2024 01:54a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2058469200

Nombre del archivo:

PROYECTO_DE_TESIS_SISTEMA_DE_MONITOREO_CON_CONEXIÓN_A_LA_NUBE_PARA_LA_MEDICIÓN_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_EN_LA_URBANIZACIÓN_DE_PRIMAVERA_DE (11.66M)

Total de palabras: 16450

Total de caracteres: 89992



PROYECTO DE TESIS SISTEMA DE MONITOREO CON CONEXIÓN A LA NUBE PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA URBANIZACIÓN DE PALERMO DEL DISTRITO DE TRUJILLO 2024.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

aws.amazon.com

Fuente de Internet

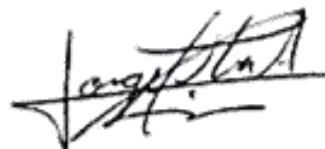
3%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2%



Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 2%

Excluir bibliografía

Activo

Jurado de sustentación Oral



Ms. Azabache Fernández Filiberto Melchor

DNI 17858660

Presidente



Ms. Alvarado Rodríguez Luis Enrique

DNI 43344790

Secretario



Ms. Cerna Sánchez, Eduardo Elmer

DNI 18216463

Vocal

Entregado el:

Aprobado por:



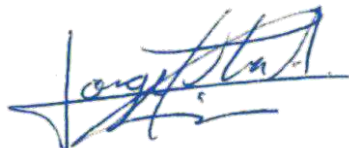
Flores Quijpe Carlos Enrique

DNI: 77912025



Tafur Mendez Walter

DNI: 71205636



Ms. Alva Alarcón Jorge Luis

DNI 40294924

Asesor de Tesis

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Sistema de monitoreo con conexión a la nube para la medición de la calidad del aire en la
Urbanización de Palermo del distrito de Trujillo - 2024

Línea de investigación: Sistemas Embebidos

Autores:

Flores Quispe, Carlos Enrique

Tafur Mendez, Walter

Jurado evaluador:

Presidente : Azabache Fernández, Filiberto

Secretario : Alvarado Rodríguez, Luis Enrique

Vocal : Cerna Sánchez, Eduardo Elmer

Asesor:

Alva Alarcón, Jorge Luis

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1288-933X>

Trujillo-Perú

2024

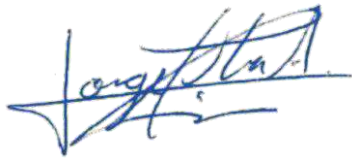
Fecha de Sustentación: 13/09/2024

DECLARACION DE ORIGINALIDAD

Yo, Alva Alarcón Jorge Luis, docente del Programa de Estudio de Pregrado de la Universidad Privada Antenor Orrego, asesor de la tesis titulada “SISTEMA DE MONITOREO CON CONEXIÓN A LA NUBE PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA URBANIZACIÓN DE PALERMO DEL DISTRITO DE TRUJILLO - 2024”, de los autores Flores Quispe Carlos Enrique y Tafur Mendez Walter.

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud del 4%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el día 26 de junio del 2024
- He revisado con detalle dicho reporte de la tesis “SISTEMA DE MONITOREO CON CONEXIÓN A LA NUBE PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA URBANIZACIÓN DE PALERMO DEL DISTRITO DE TRUJILLO - 2024” y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las normas establecidas por la Universidad.

Ciudad y fecha: Trujillo – 01 de septiembre del 2024



Alva Alarcón Jorge Luis

DNI: 40294924

ORCID: 0000-0003-1288-933X



Flores Quispe Carlos Enrique

DNI: 77912025



Tafur Mendez Walter

DNI: 71205636

DEDICATORIA

A Dios, por permitirnos culminar esta tesis, brindándonos la ayuda correspondiente.

A nuestros padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido la base fundamental de nuestra vida. Gracias por la confianza y la motivación a seguir nuestros sueños. Este logro también les pertenece a ustedes.

A nuestros seres queridos, por su paciencia y comprensión durante los momentos de intensa dedicación.

A nuestro asesor, por su orientación y sabiduría, que han sido cruciales en nuestra formación como ingenieros.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por darnos la fuerza para lograr este trabajo y poder cumplir nuestras metas. Por darnos salud y acompañarnos en este trayecto.

En segundo lugar, a nuestros padres, por el apoyo emocional y económico para lograr el desarrollo del presente trabajo. Muy agradecidos porque sin su ayuda esto no hubiera sido posible.

Agradecemos también a nuestro asesor de tesis, el Profesor MSc. Jorge Alva Alarcón, por su valiosa guía, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y consejos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial al Semillero de Ingeniería Electrónica de UPAO y a sus integrantes por proporcionarnos los recursos y el entorno académico necesario para llevar a cabo nuestra investigación.

Finalmente, gracias a todas las personas que, de una manera u otra, contribuyeron al logro de este objetivo. Su apoyo y colaboración fueron determinantes para alcanzar esta meta.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación de los parámetros de las cualidades del aire, tales como: Temperatura, Humedad relativa, Calidad del Aire (ICA) y Compuestos Orgánicos Volátiles $PM_{2.5}$ (COV), para ello, se desarrolló un sensor con la capacidad de medir estos parámetros. Todo esto, con el objetivo de determinar los niveles del Índice de Calidad del Aire (ICA), los compuestos orgánicos volátiles (COV), la temperatura y la humedad, y observar el comportamiento de la contaminación, dentro de la urbanización Primavera, en el distrito de Trujillo, Perú; ya que, dentro de la ciudad de Trujillo no se cuenta con estaciones que midan la calidad del aire, más que solo uno.

El trabajo inicio con la gran problemática que tenemos actualmente con el cambio climático y la contaminación ambiental, sobre todo, la del aire. Se menciona cuan importante es tener un sistema que mida con exactitud la calidad del aire y proporcione estos datos a las respectivas entidades para poder tomar medidas y proteger la salud de la población. Así mismo, se presentó el estado del arte donde se proporcionó toda la teoría en relación a la calidad del aire, sus parámetros de estudio, los sensores BME68X, las plataformas en la nube. El trabajo continuó con el desarrollo y la implementación del prototipo del sensor BME32 (para una toma de datos en interiores) y del sensor BME68 (para una toma de datos en exteriores); se explicó cómo es la medición del aire, la captura de los datos, su transmisión y almacenaje en la nube, terminando con el monitoreo de estos datos en un dashboard para su respectivo análisis y comparación con los datos de los sensores de Waqi y SENAMHI para evaluar su exactitud. Finalmente, el trabajo concluyo con el histórico de datos de los parámetros del aire, la validación y exactitud de los sensores, demostrando su factibilidad para el monitoreo de la calidad del aire.

Palabras clave: Calidad del aire, Compuestos orgánicos volátiles, PPM, dashboard.

ABSTRACT

The present research work consisted of evaluating the parameters of air quality, such as Temperature, Relative Humidity, Air Quality Index (AQI), and Volatile Organic Compounds PM2.5 (VOC). To achieve this, a sensor capable of measuring these parameters was developed. The objective was to determine the levels of the Air Quality Index (AQI), volatile organic compounds (VOC), temperature, and humidity, and to observe the behaviour of pollution within the Primavera urbanization in the district of Trujillo, Peru. This is significant since the city of Trujillo has only one station that measures air quality.

The work began with the significant problem we currently face with climate change and environmental pollution, particularly air pollution. It highlighted the importance of having a system that accurately measures air quality and provides this data to the respective entities to take measures to protect public health. Additionally, the state of the art was presented, providing all the theory related to air quality, its study parameters, the BME68X sensors, and cloud platforms. The work continued with the development and implementation of the BME32 sensor prototype (for indoor data collection) and the BME68 sensor (for outdoor data collection). It explained how air measurement is performed, data capture, transmission, and storage in the cloud, ending with the monitoring of this data on a dashboard for analysis and comparison with data from the Waqi and SENAMHI sensors to evaluate accuracy. Finally, the work concluded with the historical data of air parameters, validation, and accuracy of the sensors, demonstrating their feasibility for air quality monitoring.

Keywords: Air quality, Volatile organic compounds, PPM, dashboard.

PRESENTACIÓN

Estimados miembros del Jurado calificador:

De acuerdo con lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada Antenor Orrego, y para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico, nos complace presentar a su consideración este trabajo de tesis titulado:

" SISTEMA DE MONITOREO CON CONEXIÓN A LA NUBE PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA URBANIZACIÓN DE PRIMAVERA DEL DISTRITO DE TRUJILLO - 2024"

Este trabajo, que incluye diseño, implementación, comparación y análisis, se presenta para su evaluación y esperamos que cumpla con los estándares requeridos para un trabajo de tesis.

De antemano, nos excusamos de los errores involuntarios en que se hubiera incurrido en el desarrollo y redacción del misma, esperando del honorable jurado un justo dictamen.

Asimismo, aprovechamos esta oportunidad para expresar nuestro más sincero agradecimiento al cuerpo docente de la universidad, por los conocimientos y experiencias impartidos a lo largo de nuestra formación académica.

Flores Quispe, Carlos Enrique

Tafur Mendez, Walter

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
PRESENTACIÓN	XI
ÍNDICE GENERAL	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLA	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS	XVIII
I. GENERALIDADES	1
1. TÍTULO:.....	1
2. EQUIPO INVESTIGADOR:.....	1
3. TIPO DE INVESTIGACIÓN:.....	1
3.1. DE ACUERDO A LA ORIENTACIÓN O FINALIDAD.....	1
3.2. DE ACUERDO A LA TÉCNICA DE CONTRASTACIÓN	1
4. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:	1
5. UNIDAD ACADÉMICA	1
6. INSTITUCIÓN Y LOCALIDAD DONDE SE DESARROLLARÁ EL PROYECTO:.....	1
7. DURACIÓN TOTAL DEL PROYECTO:	1
7.1. FECHA DE INICIO	1
7.2. FECHA DE TÉRMINO.....	1
8. HORAS SEMANALES DEDICADAS AL PROYECTO	2
9. CRONOGRAMA DE TRABAJO.....	2
10. RECURSOS	2
10.1. RECURSOS HUMANOS.....	2
10.2. RECURSOS MATERIALES.....	2
11. PRESUPUESTO	2
11.1. BIENES	2
11.2. SERVICIOS	3

12. FINANCIACIÓN	3
II. PLAN DE INVESTIGACIÓN	4
1. EL PROBLEMA	4
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA	4
1.2. ENUNCIADO DEL PROBLEMA	5
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	6
1.4.1. <i>Impacto en la salud humana y el medio ambiente</i>	6
1.4.2. <i>Beneficios</i>	8
1.5. OBJETIVO GENERAL	8
1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2. ANTECEDENTES	9
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1. AIRE	12
3.2. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	12
3.2.1. <i>Contaminantes primarios</i>	13
3.2.1. <i>COV</i>	14
3.2.2. <i>PM_{2.5} y PM₁₀</i>	14
3.3. ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AIRE	15
3.4. SENSORES DE CALIDAD DE AIRE	17
3.4.1. <i>Sensores de Partículas de PurpleAir (GAIA A12)</i>	18
3.4.2. <i>Sensor de calidad de aire BME680</i>	19
3.4.3. <i>Funcionamiento del sensor BME680</i>	20
3.5. SISTEMAS DE MONITOREO	22
3.6. COMPONENTES Y PLATAFORMAS	23
3.6.1. <i>ESP32</i>	23
3.6.2. <i>Ubidots</i>	24
3.6.3. <i>Arduino Integrated Development Environment (IDE)</i>	24
3.6.4. <i>Protocolo MQTT</i>	25
4. MARCO CONCEPTUAL	28
5. HIPÓTESIS	28
6. VARIABLES	29
6.1. VARIABLE DEPENDIENTE	29
6.2. VARIABLE INDEPENDIENTE	29
6.3. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	29
7. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS	30

7.1.	Población	30
7.2.	Muestra	30
7.3.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	30
7.4.	Diseño de Contratación	30
7.4.1.	<i>Desarrollo de Sistema para Obtención de Datos</i>	31
A.	<i>Adquisición de Datos</i>	31
B.	<i>Procesamiento de Datos</i>	34
C.	<i>Transmisión de Datos</i>	35
D.	<i>Monitoreo</i>	36
7.4.2.	<i>Recopilación de Datos Waqi y SENAMHI</i>	39
7.5.	Procesamiento y Análisis de Datos	41
7.5.1.	<i>Sensores BME vs Waqi</i>	43
A.	<i>Análisis Descriptivo</i>	43
	<i>Gráficos Descriptivos</i>	44
B.	<i>Análisis Inferencial</i>	47
7.5.2.	<i>Sensores BME vs SENAMHI</i>	61
A.	<i>Análisis Descriptivo</i>	61
	<i>Gráficos Descriptivos</i>	62
B.	<i>Análisis Inferencial</i>	63
8.	Conclusiones	82
10.	Referencias	85
11.	Anexos	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 COMPARACIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS PM	15
FIGURA 2 VISTA DEL PRODUCTO GAIA A12	19
FIGURA 3 RELACIÓN DE CONTRATACIÓN.....	31
FIGURA 4 DIAGRAMA DE SOLUCIÓN GENERAL.....	31
FIGURA 5 ESQUEMA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	32
FIGURA 6 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN I2C Y SPI	33
FIGURA 7 SELECCIÓN DE MÓDULO.....	34
FIGURA 8 SELECCIÓN DE PUERTO.....	35
FIGURA 9 PLATAFORMA UBIDOTS.....	36
FIGURA 10 DASHBOARD EN UBIDOTS	37
FIGURA 11 RECOPIACIÓN DE DATOS EN GOOGLE SHEETS.....	39
FIGURA 12 PLATAFORMA WAQI.....	40
FIGURA 13 PLATAFORMA SENAMHI.....	41
FIGURA 14 TEMPERATURA POR DÍA-HORA	44
FIGURA 15 TEMPERATURA PROMEDIO - DÍA.....	44
FIGURA 16 HUMEDAD RELATIVA POR DÍA-HORA	45
FIGURA 17 HUMEDAD PROMEDIO DÍA.....	45
FIGURA 18 COMPUESTOS ORGÁNICOS POR DÍA - HORA.....	46
FIGURA 19 COMPUESTOS ORGÁNICOS PROMEDIO - DÍA.....	47
FIGURA 20 GRAFICA SW WAQI COV	48
FIGURA 21 GRAFICA SW BME32 COV	48
FIGURA 22 GRAFICA SW BME866 COV	49
FIGURA 23 GRAFICA SW WAQI TEMP.....	52
FIGURA 24 GRAFICA SW BME32 TEMP.....	53
FIGURA 25 GRAFICA SW BME866 TEMP.....	53
FIGURA 26 GRAFICA SW WAQI HR	57
FIGURA 27 GRAFICA SW BME32 HR.....	57
FIGURA 28 GRAFICA SW BME866 HR.....	58

FIGURA 29 <i>TEMPERATURA MÁXIMA POR DÍA</i>	62
FIGURA 30 <i>TEMPERATURA MÍNIMA POR DÍA</i>	62
FIGURA 31 <i>HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO POR DÍA</i>	63
FIGURA 32 <i>GRAFICA SS WAQI TMAX</i>	64
FIGURA 33 <i>GRAFICA SS BME32 TMAX</i>	64
FIGURA 34 <i>GRAFICA SS BME866 TMAX</i>	65
FIGURA 35 <i>GRAFICA SS SENAMHI TMAX</i>	66
FIGURA 36 <i>GRAFICA SS WAQI TMIN</i>	70
FIGURA 37 <i>GRAFICA SS BME32 TMAX</i>	71
FIGURA 38 <i>GRAFICA SS BME866 TMAX</i>	71
FIGURA 39 <i>GRAFICA SS SENAMHI TMIN</i>	72
FIGURA 40 <i>GRAFICA SS WAQI HM</i>	76
FIGURA 41 <i>GRAFICA SS BME32 HM</i>	77
FIGURA 42 <i>GRAFICA SS BME866 HM</i>	77
FIGURA 43 <i>GRAFICA SS SENAMHI HM</i>	78

ÍNDICE DE TABLA

TABLA 1 <i>DESCRIPCIÓN</i>	2
TABLA 2 <i>BIENES</i>	2
TABLA 3 <i>SERVICIOS</i>	3
TABLA 4 <i>TABLA NAAQS</i>	16
TABLA 5 <i>ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE</i>	21
TABLA 6 <i>COMPUESTOS DE MEDICIÓN</i>	21
TABLA 4 <i>VARIABLE INDEPENDIENTE</i>	29
TABLA 5 <i>VARIABLE DEPENDIENTE</i>	30
TABLA 7 <i>CUADRO RESUMEN POR ESTACIÓN Y TIPO DE DATO CLIMATOLÓGICO (BME'S VS WAQI)</i>	43
TABLA 8 <i>CUADRO RESUMEN POR ESTACIÓN Y TIPO DE DATO CLIMATOLÓGICO (BME'S VS SENAMHI)</i>	61

ÍNDICE DE ANEXOS

ESTACIÓN WAQI	47
ESTACIÓN BME 32.....	48
ESTACIÓN WAQI	52
ESTACIÓN BME 32.....	52
ESTACIÓN WAQI	56
ESTACIÓN BME 32.....	57
ANEXO A. DATOS OBTENIDOS EN EXCEL	89
ANEXO B. CÓDIGOS	100
ANEXO C. FOTOGRAFÍAS.....	103

I. GENERALIDADES

1. Título: “Sistema de monitoreo con conexión a la nube para la medición de la calidad del aire en la urbanización de Primavera del distrito de Trujillo - 2024”.

2. Equipo investigador:

1.1. Autor(es) Br. Carlos Enrique Flores Quispe

Br. Walter Tafur Mendez

1.2. Asesor(a) Msc. Ing. Jorge Luis Alva Alarcón

3. Tipo de Investigación:

3.1. De acuerdo a la orientación o finalidad

- Descriptiva

3.2. De acuerdo a la técnica de contrastación

- Preexperimental

4. Línea de Investigación:

- Sistemas embebidos

5. Unidad Académica:

Programa de Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería

Universidad Privada Antenor Orrego

6. Institución y Localidad donde se desarrollará el Proyecto:

Universidad Privada Antenor Orrego

7. Duración total del proyecto:

7.1. Fecha de inicio: 08/01/2024

7.2. Fecha de término: 30/04/2024

8. Horas semanales dedicadas al proyecto

21 horas

9. Cronograma de Trabajo

Tabla 1

Descripción

ETAPAS	FECHAS		DEDICACIÓN	
	inicio	término	semanas	Hrs/Sem
1. Planificación	08/01	15/01	2	42
2. Organización	16/01	31/01	2	42
3. Recolección de datos	23/02	23/03	4	84
4. Procesamiento de datos	24/03	10/04	2	42
5. Redacción del informe	11/01	20/04	10	210
6. Presentación del informe	20/04	29/04	1	21

10. Recursos

10.1. Recursos Humanos

Tesistas

10.2. Recursos Materiales

- Dispositivos y componentes electrónicos
- Libros y papers
- Laptop
- Celular

11. Presupuesto

11.1. Bienes

Tabla 2

Bienes

Descripción	Cantidad	Precio unidad	Precio total
Dispositivos y componentes electrónicos	20	S/200	S/400.00
Libros y papers	1	S/100	S/100.00

Laptop	1	S/3,700.00	S/3,700.00
Celular	2	S/1,400.00	S/2,800.00
TOTAL			S/7,000.00

11.2. Servicios

Tabla 3

Servicios

Descripción	Cantidad	Precio unidad	Precio total
Movilidad	360	S/1	S/360.00
Impresiones	400	S/0.20	S/80.00
Empastados	5	S/30	S/150.00
Espiralado	5	S/10	S/50.00
Internet	6	S/100	S/600.00
TOTAL			S/1,240.00

12. Financiación

Recursos propios con apoyo del Semillero de Sistemas Embebidos
UPAO

II. PLAN DE INVESTIGACIÓN

1. El problema

1.1. Realidad problemática

Debido al incremento y evolución de actividades humanas la contaminación ha pasado a ser una grave amenaza contra la vida y salud de las personas. La contaminación atmosférica no siempre es visible y son generadas por múltiples fuentes cercanas a la población. No todos los países cuentan con un monitoreo de la calidad del aire en especial los países en vía de desarrollo, según la OPS (Organización Panamericana de la Salud) 117 países son los que monitorean la calidad del aire, pero su población sigue respirando niveles insalubres de materia particulada fina y dióxido de nitrógeno. El 17% de las ciudades de los países de ingresos altos está por debajo de los umbrales establecidos por Directrices de la OMS (Organización Mundial de la Salud) sobre la calidad del aire para MP2,5 o MP10. Indica también que, en países de ingresos bajos y medios, menos del 1% de las ciudades tienen una calidad del aire que se ajusta a los umbrales recomendados por la OMS (OMS & OPS, 2022).

Según el último reporte de IQAir titulado World Air Quality Report 2022, Perú es el que muestra una mayor deficiencia en la calidad del aire al nivel de América Latina, con una concentración promedio PM2.5 de 29.6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ocupando el puesto 26 en el mundo. Lima, es la ciudad más afectada, superando el promedio con 31.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y posicionada en el puesto 22 de ciudades con la peor calidad de aire (Fuller et al., 2022).

En el Perú solo se realiza el monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Lima, con una red de 10 estaciones de SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) que monitorean un área de 3000 km² para 10 millones de habitantes. En nuestro territorio, se debe cumplir los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) establecidos por el Ministerio del Ambiente y supervisados por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). Pero, la realidad es que hay una baja cantidad de estaciones de medición que dificultan esta tarea. La escasez de estos, se

debe a los altos costos de dichas estaciones, así como sus altos costos de mantenimiento y operación (SENAMHI, 2023).

De acuerdo al Geo visor Cartográfico de calidad de aire en la plataforma de SENAMHI, departamentos y ciudades como La Libertad, Arequipa, Apurímac, Piura, Lambayeque, etc. no cuentan con una estación que monitoree algún parámetro para determinar la condición del aire.

Después de Lima, la ciudad con mayor contaminación en Perú es Trujillo. Esta ciudad no cuenta con un monitoreo constante de la calidad de aire por parte de SENAMHI, sin embargo, otras plataformas como PurpleAir y Waqui muestran un único punto de monitoreo, ubicado en la urbanización Primavera. Este punto resulta insuficiente para determinar la calidad de aire promedio de toda la ciudad.

A consecuencia de ello, en este trabajo se plantea el desarrollo de un dispositivo electrónico para recopilar parámetros de la atmosfera que permitan determinar la calidad de la misma, tomando en cuenta los criterios dados por la OMS. La data será subida a la nube y será visible, a través de un Dashboard, para la colectividad.

1.2. Enunciado del Problema

De acuerdo a lo anterior, el problema es causado por la falta de estaciones de monitoreo para llevar un registro del estado del aire y de la contaminación existente dentro del distrito de Trujillo, principalmente dentro de la urbanización de Palermo. De esta manera compartirlo públicamente para que otras entidades conozcan y tomen medidas en el asunto.

1.3. Formulación del Problema

¿Cómo medir con una mayor exactitud los niveles del Índice de Calidad del Aire (ICA), los compuestos orgánicos volátiles (VOC), la temperatura y la humedad de manera que se obtengan datos históricos y observar el comportamiento de la contaminación en la urbanización de Palermo de la ciudad de Trujillo?

1.4. Justificación del estudio

Se sabe que no todas las sustancias que hay en el aire se consideran contaminantes. Pero existen ciertos contaminantes en la atmósfera que afectan negativamente en la salud humana, el medio ambiente y el patrimonio cultural (edificios, monumentos y materiales). Muchos contaminantes provienen de fenómenos naturales, como las erupciones volcánicas, los incendios forestales y las tormentas de arena, y muchos otros son antropogénicos; siendo todos liberados a la atmósfera. Una vez que estas sustancias están en la atmósfera pueden intervenir en reacciones químicas y contribuir a la contaminación atmosférica (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2023).

A pesar de las importantes mejoras logradas en las últimas décadas, la contaminación atmosférica sigue perjudicando nuestra salud y el medio ambiente, tanto que afectan la calidad de vida y reducen la esperanza de vida.

1.4.1. Impacto en la salud humana y el medio ambiente

Las partículas en suspensión, también conocidas como PM, son consideradas como el contaminante atmosférico más peligroso para la salud humana. Estas partículas son tan ligeras que pueden permanecer suspendidas en el aire y son tan diminutas que pueden penetrar en los pulmones y en la sangre, alcanzando un tamaño entre una treintava y una quinta parte del diámetro de un cabello humano. Las PM pueden contener metales pesados como el arsénico, cadmio, mercurio y níquel. (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2023).

La Organización Mundial de la Salud ha publicado un informe titulado "Review of evidence on health aspects of air pollution" (Examen de las pruebas sobre los aspectos sanitarios de la contaminación atmosférica), en el cual se demuestra que las partículas en suspensión (PM_{2,5}) son perjudiciales para la salud. Estas partículas son tan pequeñas que pueden penetrar en nuestros pulmones y llegar a la sangre, y se ha demostrado que pueden provocar aterosclerosis, efectos negativos en los partos, enfermedades respiratorias infantiles, y posiblemente afectar

el neurodesarrollo, la función cognitiva y la diabetes. Además, se confirma la relación causal entre las PM_{2,5} y las muertes por enfermedades cardiovasculares y respiratorias. (WHO Regional Office for Europe, 2013).

La composición química de las partículas en suspensión puede tener un impacto en el clima, ya que pueden contribuir al calentamiento o enfriamiento del planeta. El negro de carbono, que es un componente común del hollín y se encuentra principalmente en las partículas finas de menos de 2,5 micras de diámetro, es producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles y de leña. En áreas urbanas, las emisiones de negro de carbono provienen principalmente de los motores diésel de los vehículos. Además de sus efectos en la salud, las partículas de negro de carbono también contribuyen al cambio climático al absorber la energía solar y calentar la atmósfera. La quema de combustibles por parte de vehículos, camiones, centrales eléctricas y otras instalaciones industriales también puede cambiar la composición química de muchas sustancias.

Además, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el amoníaco (NH₃) son contaminantes atmosféricos que se forman cuando el nitrógeno reacciona con el oxígeno y el hidrógeno, respectivamente. Estos contaminantes tienen efectos perjudiciales en la salud humana y la naturaleza. Por otro lado, el benceno, que se agrega a la gasolina, puede causar cáncer y dañar el material genético de las células. El benzo(a)pireno (BaP) es otro gas que se libera durante la quema de leña o carbón en estufas y en el humo de los gases de escape de los motores diésel de los coches. El BaP no solo causa cáncer, sino que también irrita los ojos, la nariz, la garganta y los bronquios.

En resumen, es complicado calcular completamente los efectos negativos que la contaminación atmosférica tiene sobre nuestra salud y el medio ambiente. A pesar de esto, se han realizado numerosos estudios que se centran en áreas específicas o fuentes de contaminación. Según el proyecto Aphekom, la contaminación del aire en Europa reduce la esperanza de vida de cada persona en aproximadamente 8,6 meses (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2023).

1.4.2. Beneficios

Los principales beneficios del sistema de monitoreo de calidad del aire llegarían a los organismos de vigilancia, supervisión y control ambiental, tales como el SENAMHI, Ministerio del Ambiente y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). También el área de salud pública y los grupos sensibles a la contaminación del aire, donde se podría alarmar a los ciudadanos sobre los lugares y horas donde los límites permitidos están siendo sobrepasados. Esta información histórica recopilada puede ayudar a entidades a identificar y predecir zonas frecuentemente contaminadas y crear acciones paliativas.

1.5. Objetivo General

Determinar los niveles del Índice de Calidad del Aire (ICA), los compuestos orgánicos volátiles (COV), la temperatura y la humedad, y observar el comportamiento de la contaminación, dentro de la urbanización Primavera en el distrito de Trujillo.

1.6. Objetivos Específicos

- Identificar los diversos sistemas de medición de la calidad del aire existentes en Trujillo.
- Diseñar un prototipo electrónico que lea la calidad del aire, basado en el sensor BME680, y envíe la información a una plataforma de datos en la nube.
- Elaborar un dashboard para registrar un histórico de datos obtenidos en el monitoreo del aire.

- Hacer una comparativa de los datos obtenidos con los datos del sistema de Waqui.

2. Antecedentes

A continuación, se presentan diferentes investigaciones referentes al problema de investigación del presente estudio.

Jose y Sasipraba (2019), en su investigación titulada “Indoor air quality monitors using IOT sensors and LPWAN”, identifican la calidad del aire interior con la ayuda de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) utilizando los sensores BME680 de bosch, SGP30 y CCS811 y la red de área amplia de baja potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés) para la transferencia de datos. Aquí los gases CO₂ equivalente, etanol, TCoV, etc, son medidos por los sensores mencionados. Como resultado generan gráficos para mostrar índices de calidad de aire (ICA) y los niveles de gas, como CO₂ equivalente, compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros niveles de gas y siguiendo lineamientos determinan si la calidad del aire es o no saludable. El aporte a nuestro trabajo se basa en el uso de estos lineamientos de salud que nos ayudarán a determinar la condición del aire con los niveles medidos.

Marinov et al. (2019), en su investigación titulada “Portable air purifier with air quality monitoring sensor”, presenta el desarrollo e implementación de un innovador purificador de aire portátil. Para ello, hace uso de un sensor SDS011, un receptor de infrarrojos CHQ1838, el microprocesador Arduino uno y el módulo de visualización SPI-interfaced LCD. Este dispositivo es un novedoso purificador de aire portátil con un conjunto de filtros para mejorar la calidad del aire en espacios pequeños como el interior de salones y oficinas. La investigación concluye con la eficacia del purificador portable de aire en la recogida de partículas PM de un diámetro de 9 micras en una sala de pruebas en diferentes modos de funcionamiento. Los experimentos confirman la buena eficacia de la solución propuesta. Esta investigación nos ayuda a ver la funcionalidad de un sistema de control de calidad de aire y su implementación, trabajando con sensores y microcontroladores.

Rohan Kumar (2020), en su investigación titulada “Air Quality Sensing and Reporting System Using IoT”, el modelo presentado aquí, utiliza una combinación del software y hardware Arduino UNO junto con sensores de gas - MQ135, MQ7 y sensor de polvo GP2Y1010AU0F. Este trabajo de investigación monitorea la calidad del aire a través de una plataforma de análisis IoT, ThingSpeak, utilizando Internet conectado con el hardware a través del módulo Wi-Fi ESP8266. Esta investigación da como resultado 4 campos para los distintos datos de entrada. El campo 1 muestra la concentración de NO en ppm con respecto al tiempo de una forma gráfica más fácil de visualizar. De manera similar, el campo 2 muestra la concentración de gas CO con respecto al tiempo, el campo 3 muestra la concentración de partículas de polvo PM_{2.5} en el aire con respecto al tiempo y el campo 4 muestra el Índice de Calidad del Aire (ICA) con respecto al tiempo. Brinda a nuestra investigación conocimientos teóricos y prácticos mediante un diagrama de bloques para un sistema IoT relacionado a la calidad del aire, así mismo la plataforma web usada (ThingSpeak) aportará a en nuestra investigación para subir los datos obtenidos, a manera de prueba, a la nube de forma más rápida.

Kok et al. (2020), en su investigación titulada “IoT based Low Cost Distributed Air Quality Monitoring System for Big Data Collection”, describe un Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire Distribuido (DAQMS, por sus siglas en inglés) en tiempo real que utiliza dispositivos IoT de bajo costo para medir la concentración de gases contaminantes en diferentes ubicaciones de una ciudad. El sistema se basa en una red inalámbrica de sensores de gas que transmiten datos a una nube, donde se almacenan y procesan. Los datos se visualizan en una plataforma web interactiva para que los usuarios puedan monitorear la calidad del aire en tiempo real y recibir alertas cuando los niveles de contaminación excedan ciertos umbrales. Como conclusión presentan los resultados de las pruebas de campo realizadas en diferentes ubicaciones de una ciudad, demostrando que el sistema puede detectar niveles elevados de contaminantes y proporcionar información útil para la toma de decisiones sobre políticas ambientales. Esta investigación al trabajar también con un hardware de bajo costo, como es el ESP32 y el sensor DHT-11, muestra que

el uso de tecnologías IoT de bajo costo puede ser una solución efectiva para monitorear la calidad del aire y mejorar la calidad de vida en áreas urbanas.

Faiazuddin et al. (2020), en su investigación titulada "IoT based Indoor Air Quality Monitoring system using Raspberry Pi4" abarcan la problemática de la contaminación ambiental en áreas urbanizadas. Con el objetivo de desarrollar un sistema de monitoreo de la calidad de aire interior, utilizan una Raspberry Pi4 con Grove - Air Quality Sensor v1.3, CCS811 CO₂ Air Quality Sensor, DHT 11 sensor de humedad y temperatura. La comunicación entre el sensor y Raspberry Pi4 la realizan a través de un protocolo de comunicación de puerto serie y el código implementado en la interfaz de Python. Esto les permite monitorear: el volumen de CO, CO₂, temperatura, humedad, fuga de gas, humo, temperatura, etc. La información de estos parámetros las recibe Rasp Pi4 y las procesa a la nube donde se monitorea continuamente y la almacena en la base de datos de la nube. Esta investigación concluye con el desarrollo de un sistema de monitorización de la calidad del aire integrado entre redes de sensores sin conexión y el Internet de las Cosas basado en la nube ThingSpeak y una monitorización remota completa de la calidad del aire del ambiente interior. Este trabajo es similar a la investigación a realizar tanto en sus componentes y en la recolección de datos, por lo que nos sirve de guía para el desarrollo de nuestro sistema de monitoreo de calidad del aire.

Esfahani et al. (2020), en su investigación titulada "Smart City Battery Operated IoT Based Indoor Air Quality Monitoring System", presenta el diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo y detección de calidad del aire interior con conexión a IoT de bajo costo con 30 horas de duración de la batería, en la cabina de un vehículo. Esta unidad está diseñada para monitorear los COV totales, CO₂, PM2.5, PM 10, temperatura, humedad e iluminancia. Los componentes utilizados en este sistema son el sensor de calidad del aire (CCS811), el sensor de temperatura y humedad (BME680), el sensor de monóxido de carbono (SCD30), el sensor de polvo (SPS30), el multiplexor, el microcontrolador y las plataformas IoT. Este dispositivo está conectado a las plataformas IoT Blynk Apps y ThingSpeak. El sistema utiliza los datos ambientales para proporcionar recomendaciones, como aumentar la ventilación o reducir los niveles de actividad, que pueden ayudar a los usuarios

a mejorar la calidad del aire. Este prototipo se puede utilizar como un nodo para monitorear la calidad del aire en redes a gran escala para Smart Cities y sirve como modelo a la presente investigación ya que hacemos uso del sensor BME680.

3. Marco Teórico

3.1. Aire

El aire es la mezcla invisible regularmente homogénea de gases que rodea la Tierra. El aire contiene sustancias importantes, como el oxígeno y el nitrógeno, que la mayoría de las especies necesitan para sobrevivir. Su composición promedio es de: 78% Nitrógeno, 21% Oxígeno y 1% Otras sustancias (National Geographic, 2023).

El aire limpio sostiene la vida humana, animal y vegetal en la Tierra. US EPA (2022) mencionan que la composición de los gases traza (gases menores al 1%) en la atmósfera juega un papel importante a la hora de afectar el clima. Además, que la contaminación del aire influye perjudicando las funciones críticas de la atmósfera de muchas maneras:

- La polución del aire ya sea en ambientes interiores o exteriores, puede tener una serie de efectos en la salud humana, incluyendo ataques cardíacos, asma, bronquitis, visitas hospitalarias y a la sala de emergencias, días perdidos de trabajo o escuela, actividad restringida, síntomas respiratorios y mortalidad prematura.
- Algunos tipos de polución del aire al aire libre pueden disminuir la visibilidad y, cuando se depositan en la superficie de la Tierra a través de la lluvia u otros procesos, pueden dañar bosques, lagos, arroyos, superficies de construcción y carreteras.
- A nivel global, la polución del aire puede alterar la composición de la atmósfera con graves consecuencias, incluyendo la reducción de la capa de ozono de la Tierra y el cambio climático.

3.2. Contaminantes Atmosféricos

La contaminación del aire se refiere a la liberación de contaminantes en el aire, los cuales son perjudiciales para la salud humana y para el planeta en su conjunto (Mackenzie & Turrentine, 2021).

En función de su origen los contaminantes pueden clasificarse en primarios y secundarios:

3.2.1. Contaminantes primarios

(Generalitat Valenciana, 2023) presenta a los agentes contaminantes primarios como elementos que se descargan directamente en la atmósfera por medio de diversas fuentes emisoras, como pueden ser las chimeneas, los procesos industriales o la quema de combustibles fósiles, etc. Entre los contaminantes primarios más destacados en el ámbito atmosférico se incluyen los que se mencionan a continuación:

- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Óxidos de azufre (SO_x)
- Hidrocarburos (HC)

Además, en la atmósfera puede haber otras sustancias que generen consecuencias negativas, y dentro de estas se incluyen las siguientes:

- Anhídrido carbónico (CO₂)
- Halógenos y sus derivados
- Partículas de metales pesados y ligeros
- Sustancias radiactivas

En resumen, más del 90% de la polución atmosférica se compone de estas sustancias. Los contaminantes secundarios, por su parte, surgen como resultado de las modificaciones que sufren los contaminantes primarios a causa de las reacciones químicas y físicas en la atmósfera. Además de los daños que cada agente contaminante produce individualmente en el medio ambiente, existen ciertos problemas de alcance global en la Tierra que se generan debido a la combinación de los contaminantes primarios y secundarios. Estos problemas incluyen el efecto invernadero, la acidificación del medio ambiente, el smog fotoquímico y la destrucción de la capa de ozono.

3.2.1. COV

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) explica que los compuestos orgánicos volátiles (COV) se emiten como gases de ciertos sólidos o líquidos. Los COV incluyen una variedad de productos químicos, algunos de los cuales pueden tener efectos adversos para la salud a corto y largo plazo. Las concentraciones de muchos COV son consistentemente más altas en interiores (hasta diez veces más altas) que en exteriores. Los COV son emitidos por una amplia gama de productos que se cuentan por miles. Los ejemplos incluyen: pinturas y lacas, decapantes de pintura, suministros de limpieza, pesticidas, materiales de construcción y muebles, equipo de oficina como fotocopiadoras e impresoras, líquidos correctores y papel de copia sin carbón, materiales gráficos y artesanales, incluidos pegamentos y adhesivos, marcadores permanentes y soluciones fotográficas (US EPA, 2023b).

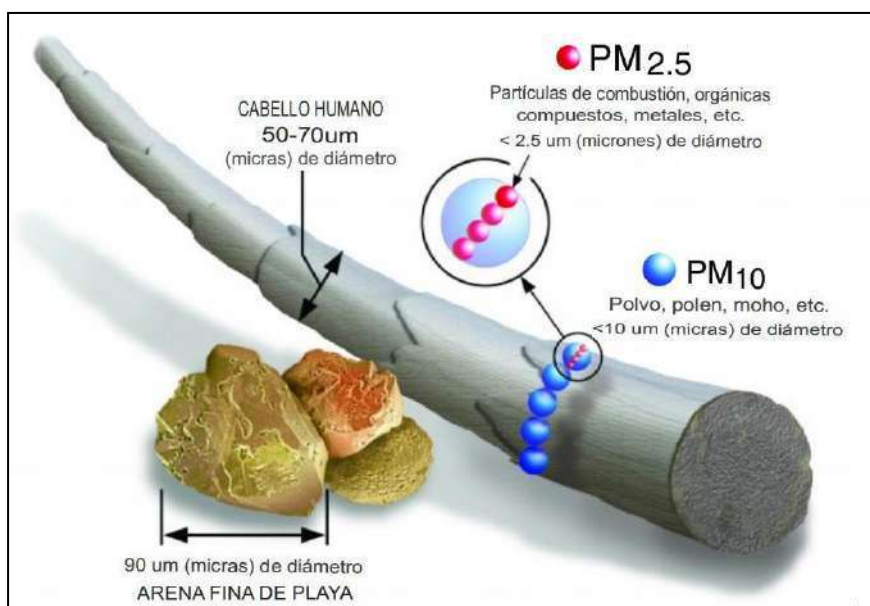
3.2.2. PM_{2.5} y PM₁₀

US EPA (2022) define las siglas PM como material particulado o partículas en suspensión (también llamado contaminación por partículas), es el término usado para una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín o el humo, son lo suficientemente grandes u oscuras como para verse a simple vista. Otros son tan pequeños, más que un cabello humano, que solo pueden detectarse con un microscopio electrónico. El cabello humano promedio tiene alrededor de 70 micrómetros de diámetro, lo que lo hace 30 veces más grande que la partícula fina más grande. Ver Figura 1. Entre ellas incluye:

- PM₁₀: partículas inhalables, con diámetros generalmente de 10 micrómetros o menores.
- PM_{2.5}: partículas finas inhalables, con diámetros que generalmente son de 2,5 micrómetros o menores.

Figura 1

Comparaciones de tamaño de partículas PM



Nota. Adaptado de *Size comparisons for PM particles*, por U.S. Environmental Protection Agency, 2022, US EPA

(<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>)

Existen partículas que son emitidas de manera directa desde una fuente como las obras de construcción, campos, chimeneas o incendios, mientras que otras son producidas en la atmósfera a través de reacciones químicas complejas que implican sustancias como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. Estos contaminantes son emitidos por diversas fuentes, como centrales eléctricas, industrias y automóviles (US EPA, 2022a).

3.3. Estándares de calidad de aire

El Acta del Aire Limpio, que fue modificada por última vez en 1990, requiere que la Agencia de Protección Ambiental establezca Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés) para seis contaminantes principales ("criterios" de contaminantes atmosféricos) que pueden ser perjudiciales para la salud pública y el medio ambiente. Esta acta identifica dos tipos de estándares nacionales de calidad del aire ambiente. Los estándares primarios brindan protección a la salud pública, incluida la protección de la salud de poblaciones "sensibles" como asmáticos, niños y

ancianos. Los estándares secundarios brindan protección al bienestar público, incluida la protección contra la disminución de la visibilidad y el daño a animales, cultivos, vegetación y edificios. Estos estándares son revisados periódicamente y en ocasiones se establecen nuevos estándares (US EPA, 2023a). En la Tabla 4, se presentan los estándares establecidos más recientemente:

Tabla 4

Tabla NAAQS

CONTAMINANTE		Primario/ Secundario	Tiempo promedio	Nivel	Forma
Monóxido de Carbono (CO)		primario	8 horas	9 ppm	No debe de exceder más de una vez al año
			1 hora	35 ppm	
Plomo (Pb)		primario y secundario	Promedio móvil de 3 meses	0,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	No debe excederse
Dióxido de nitrógeno (NO₂)		primario	1 hora	100 ppb	Percentil 98 de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediadas durante 3 años
		primario y secundario	1 año	53 ppb	Media anual
Ozono (O₃)		primario y secundario	8 horas	0,070 ppm	La cuarta concentración máxima diaria anual de 8 horas más alta, promediada durante 3 años
Contaminación por partículas (PM)	PM _{2,5}	primario	1 año	12,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual, promediada durante 3 años
		secundario	1 año	15,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual, promediada durante 3 años

		primario y secundario	24 horas	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Percentil 98, promedio de 3 años
	PM ₁₀	primario y secundario	24 horas	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	No debe excederse más de una vez al año en promedio durante 3 años
Dióxido de azufre (SO₂)		primario	1 hora	75 ppb	percentil 99 de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediadas durante 3 años
		secundario	3 horas	0,5 ppm	No debe excederse más de una vez al año

Nota. Adaptado de *NAAQS Table* por US EPA, 2023, US EPA (<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>)

Las unidades de medida para los estándares son partes por millón (ppm) por volumen, partes por mil millones (ppb) por volumen y microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.4. Sensores de calidad de aire

Los detectores de calidad del aire son instrumentos electrónicos que detectan y miden sustancias químicas y/o contaminantes específicos presentes en el aire. Dichos dispositivos pueden ser utilizados de diversas maneras, tales como monitorear la calidad del aire en ambientes interiores o exteriores, y algunos son portátiles. Actualmente, estos sensores se encuentran en una fase temprana de desarrollo tecnológico, y muchos de ellos aún no han sido evaluados para determinar la precisión de sus mediciones. Los requisitos de rendimiento de los sensores varían dependiendo de su aplicación específica. Para asegurar que los datos recogidos sean útiles para el fin previsto, es importante comprender tanto las limitaciones como las fortalezas de los sensores de aire, incluyendo las características básicas del sensor, su modo de uso y el análisis de las mediciones.

Adicionalmente, los dispositivos de detección de calidad del aire son menos costosos, se pueden llevar fácilmente de un lugar a otro y por lo general son más sencillos de operar que los monitores regulados. El mercado de la tecnología de estos sensores se está expandiendo, ya que cada vez más empresas están proporcionando monitores de bajo costo para el público en general. Los nuevos sensores de calidad del aire, económicos y altamente portátiles, ofrecen a las personas la oportunidad de emplear esta tecnología para una amplia gama de aplicaciones, como investigación, seguimiento de la exposición personal, complementación de la supervisión existente, estudio de las fuentes de emisión, educación y concienciación. De esta manera, se proporciona más información sobre la calidad del aire que respiramos y su posible impacto en nuestra salud y bienestar (Air Central Texas, 2023).

3.4.1. Sensores de Partículas de PurpleAir (GAIA A12)

Los sensores PurpleAir, creados por Adrian Dybwad, son muy populares debido a su capacidad para medir partículas suspendidas en el aire. Estos sensores utilizan la última tecnología de conteo de partículas láser para proporcionar mediciones precisas y en tiempo real de PM_{1.0}, PM_{2.5} y PM₁₀. Además, son fáciles de instalar y solo requieren una toma de corriente y una conexión a Wifi para enviar información al mapa en tiempo real de PurpleAir. El precio de estos sensores varía de 199 a 299 dólares, dependiendo de su uso específico. Además, cuentan con una plataforma web bien desarrollada que incluye un mapa en tiempo real para monitorear los sensores, información de proyectos, un blog y ayuda para los usuarios (PurpleAir, 2023).

El dispositivo del que se tomará referencia es el GAIA A12, Ver Figura 2, esta estación lleva los siguientes sensores:

- Sensores de partículas de calidad del aire: Incluye tres PMS 5003.
- Sensores meteorológicos: Utiliza el ASAIR AHT-20.

- LED RGB: Proporciona indicación visual en tiempo real sobre la contaminación del aire.
- Conectividad vía WIFI: Dispone de una antena externa para la conexión inalámbrica.
- Almacenamiento opcional en tarjeta SD: Esto permite su funcionamiento incluso cuando no está conectada a la red.

Figura 2

Vista del producto GAIA A12



Nota. Adaptado de *Gaia air quality monitors - product series*, por AQICN, 2023, AQICN Org. (<https://aqicn.org/gaia/>)

Para garantizar la mejor calidad de datos, el GAIA A12 utiliza tres sensores redundantes de calidad del aire. Su sistema correlaciona continuamente los datos de todos los sensores para detectar y corregir automáticamente cualquier dato anormal.

3.4.2. Sensor de calidad de aire BME680

El sensor BME680 es un innovador sensor de aire desarrollado por BOSCH Sensortec, que combina sensores de gas, temperatura, humedad y presión en un solo dispositivo de alta precisión y linealidad.

Este sensor cuenta con una excelente estabilidad a largo plazo y un consumo ultra bajo de energía, lo que lo hace ideal para aplicaciones móviles. Además, es capaz de detectar una amplia variedad de gases, como compuestos orgánicos volátiles, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para medir la calidad del aire en términos de salud personal, y también de detectar gases provenientes de pinturas murales, adhesivos, productos de limpieza, alcohol como el etanol y el alcohol, así como gases como el monóxido de carbono, lo que lo convierte en un completo sensor ambiental autónomo (Circuit Schools, 2022).

Estas funcionalidades le permiten al sensor BME680 medir los siguientes parámetros con mayor precisión:

- Temperatura
- Humedad
- Presión
- Algunos Gases (COV)
- Altitud
- Punto de rocío (puede calcularse mediante un código de software utilizando la temperatura y la humedad)

3.4.3. Funcionamiento del sensor BME680

El sensor de gas BME680 tiene una superficie de óxido metálico (MOx) para medir los gases COV en el ambiente circundante. Generalmente, los sensores basados en óxido metálico tienen una superficie sensible de óxido metálico (un chip) para medir la conductividad eléctrica y un calentador para la superficie del óxido metálico sensible. Cuando se enciende el sensor, el calentador calienta la superficie de óxido metálico y el oxígeno se absorbe en la superficie. En el aire limpio, los electrones del óxido metálico son atraídos por las moléculas de oxígeno del aire y forman una barrera de potencial que resiste el flujo de corriente eléctrica. Así, cuando los gases COV entran en contacto con la superficie sensible de óxido metálico, reaccionan con las moléculas de oxígeno de la superficie,

por lo que los electrones se liberan de las moléculas de oxígeno, lo que reduce la barrera de potencial y aumenta el flujo de corriente eléctrica.

En resumen, cuando los gases COV entran en contacto con el sensor, la resistencia aumenta, lo que reduce la conductividad eléctrica, y cuando los gases COV disminuyen, la resistencia disminuye, lo que aumenta la conductividad eléctrica. Midiendo la resistencia podemos detectar los gases COV y también es posible calcular un índice de calidad del aire, como se muestra en la Tabla 5. El BME680 no puede detectar los gases COV individualmente, sino que da la suma de los gases COV. El BME680 detecta la mayoría de los gases COV, pero no detecta el dióxido de carbono (CO₂), en lugar de eso nos da como parámetro CO₂ equivalente (Circuit Schools, 2022).

Tabla 5

Índice de calidad del aire

Resistencia (ICA)	Calidad aire
0 – 50	Bien
51 – 100	Promedio
101 – 150	Un poco mal
151 – 200	Malo
201 – 300	Peor
301 – 500	Muy mal

El Datasheet del sensor proporciona los siguientes valores mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6

Compuestos de medición

Fracción molar	Compuesto	Tolerancia de producción	Precisión certificada
5 ppm	etano	20%	5%

10ppm	Isopreno /2- metil-1,3 butadieno	20%	5%
10ppm	Etanol	20%	5%
50 ppm	Acetona	20%	5%
15 ppm	Monóxido de carbono	10%	2%

El BME680 ofrece una exactitud de 1.0 °C al medir la temperatura, un 3% de precisión al medir la humedad y una precisión de 1 hPa al medir la presión barométrica, lo que se traduce en una precisión de ± 1 metro al medir la altitud. Y su rango de medición varía entre -40 a 85 °C para la temperatura, 0 a 100 % para la humedad y 300 a 1100 hPa para la presión.

3.5. Sistemas de monitoreo

Existen diversos sistemas para medir la contaminación del aire, con métodos físicos y químicos o métodos más sofisticados a través de técnicas electrónicas. El Ministerio del ambiente del Perú (Minam) detalla cuatro métodos principales para medir la contaminación del aire:

- a) **Métodos pasivos de muestreo:** ofrecen una manera confiable y rentable de analizar la calidad del aire, lo que proporciona una buena indicación de las concentraciones medias de contaminación durante periodos prolongados de tiempo, como semanas o meses. Los dispositivos pasivos, llamados así porque no requieren bombeo, controlan el flujo de aire mediante procesos físicos, como la difusión.
- b) **Métodos activos de muestreo:** utilizan métodos físicos o químicos para recoger aire, y el análisis se realiza posteriormente en el laboratorio. Normalmente, se bombea un volumen de aire conocido a través de un colector, como un filtro o una solución química, durante un período de tiempo determinado. El colector se retira más tarde para su análisis. Aunque las muestras pueden

recolectarse diariamente, lo que proporciona mediciones para periodos cortos de tiempo, el costo es menor que los métodos de monitoreo automático.

- c) Métodos automáticos:** producen mediciones de alta resolución de las concentraciones de contaminantes por hora o incluso en periodos más cortos, en un solo punto. Los contaminantes que se analizan incluyen ozono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono y partículas, y las muestras se analizan utilizando una variedad de métodos, como la espectroscopia y la medición de gas. Una vez analizada, la muestra se descarga en tiempo real, lo que proporciona información muy precisa.
- d) Analizadores remotos de trayectoria larga y ópticos:** utilizan técnicas espectroscópicas y realizan mediciones en tiempo real de las concentraciones de una variedad de contaminantes, como el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

En cualquier método de muestreo, la cantidad de contaminación en el aire se mide generalmente por su concentración. Esta puede definirse en términos de la proporción del volumen total que representa, y se expresa como partes por millón por volumen (ppmv), partes por billón por volumen (ppbv) o partes por billón (millones de millones) por volumen (pptv), para gases contaminantes en la atmósfera. También se miden las concentraciones de contaminantes por el peso del contaminante dentro de un volumen estándar de aire, como microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) o miligramos por metro cúbico (mg/m^3) (Minam et al., 2021).

3.6. Componentes y plataformas

3.6.1. ESP32

El ESP32 es una serie de sistemas en un chip (SoC, por sus siglas en inglés) de bajo costo y bajo consumo energético con capacidades Wi-Fi y Bluetooth de doble modo, creados por Espressif Systems. En su núcleo, cuenta con un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo o de un solo núcleo con una velocidad de reloj de hasta 240 MHz. Además, está altamente integrado con interruptores de antena

incorporados, balun de RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de gestión de energía. Diseñado para dispositivos móviles, electrónica vestible y aplicaciones de IoT, logrando un consumo ultra bajo de energía a través de características de ahorro de energía que incluyen la conmutación de reloj de resolución fina, múltiples modos de energía y la escalabilidad de energía dinámica (Espressif Systems, 2017).

3.6.2. Ubidots

Ubidots es una plataforma de IoT que capacita a innovadores e industrias para prototipar y escalar proyectos de IoT a producción. La plataforma de Ubidots se utiliza para enviar datos a la nube desde cualquier dispositivo habilitado para Internet. Luego, se configura acciones y alertas basadas en sus datos en tiempo real y se desbloquea el valor de sus datos a través de herramientas visuales. Ubidots ofrece una API REST que permite leer y escribir datos en los recursos disponibles: fuentes de datos, variables, valores, eventos y conocimientos. La API admite tanto HTTP como HTTPS y requiere una clave API. Los datos son protegidos con dos réplicas adicionales, almacenamiento encriptado y soporte de datos TLS/SSL opcional. También permite personalizar grupos de permisos para cada módulo de la plataforma, asegurándose de que la información correcta se muestre al usuario adecuado (Ubidots, 2023).

3.6.3. Arduino Integrated Development Environment (IDE)

Arduino (IDE) es un software de código abierto utilizado para programar las placas de Arduino. Se trata de un entorno de desarrollo integrado desarrollado por arduino.cc que permite escribir y subir código a las placas de Arduino. Contiene numerosas bibliotecas y un conjunto de ejemplos de proyectos pequeños. Además, es compatible con diferentes sistemas operativos (Windows, Linux, Mac OS X) y admite los lenguajes de programación C/C++.

El Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino, o el Software de Arduino (IDE), incluye un editor de texto para escribir código, un área

de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones para funciones comunes y una serie de menús. Se conecta al hardware de Arduino para subir programas y comunicarse con ellos. Los programas escritos utilizando el Software de Arduino (IDE) se llaman sketches. Estos sketches se escriben en el editor de texto y se guardan con la extensión de archivo .ino. El editor cuenta con características para cortar/pegar y para buscar/reemplazar texto. El área de mensajes proporciona comentarios mientras se guarda y exporta, y también muestra errores. La consola muestra la salida de texto del Software de Arduino (IDE), incluyendo mensajes de error completos y otra información (Arduino, 2023).

3.6.4. Protocolo MQTT

MQTT es un protocolo de mensajería basado en estándares, o conjunto de reglas, utilizado para la comunicación máquina a máquina para el Internet de las cosas. Sensores inteligentes, dispositivos portátiles y otros dispositivos de IoT generalmente tienen que transmitir y recibir datos sobre una red con recursos limitados y ancho de banda reducido. Es por eso que, utilizan MQTT para la transmisión de datos, ya que es fácil de implementar y puede comunicar datos de IoT de manera eficiente. MQTT admite la mensajería entre dispositivos y la nube, y viceversa. Está diseñado como un transporte de mensajería de publicación/suscripción extremadamente liviana que es ideal para conectar dispositivos remotos con un pequeño tamaño de código y un ancho de banda de red mínimo. Hoy en día, MQTT se utiliza en una amplia variedad de industrias, como la automotriz, la manufacturera, las telecomunicaciones, el petróleo y el gas, etc. (Amazon, 2023).

MQTT (2022) nos dice que, su protocolo se ha convertido en un estándar para la transmisión de datos IoT debido a que ofrece los siguientes beneficios:

- 1. Ligero y eficiente:** la implementación de MQTT en dispositivos IoT requiere de recursos mínimos, por lo que incluso puede

utilizarse en microcontroladores pequeños. Los encabezados de los mensajes MQTT también son pequeños para optimizar el ancho de banda de la red.

2. **Escalable:** la implementación de MQTT requiere una cantidad mínima de código que consume muy poca energía en las operaciones. Por lo tanto, se puede implementar el protocolo MQTT para conectarse con millones de estos dispositivos.
3. **Confiable:** MQTT tiene características incorporadas que reducen el tiempo que tarda el dispositivo IoT en volver a conectarse con la nube. También define tres niveles de calidad de servicio diferentes para garantizar la confiabilidad en casos de uso de IoT: como máximo una vez (0), al menos una vez (1) y exactamente una vez (2).
4. **Seguro:** MQTT facilita a los desarrolladores el cifrado de mensajes y la autenticación de dispositivos y usuarios mediante protocolos de autenticación modernos, como OAuth, TLS1.3, certificados administrados por el cliente y más.
5. **Muy compatible:** varios lenguajes como Python tienen un soporte extenso para la implementación del protocolo MQTT. Por lo tanto, los desarrolladores pueden implementarlo rápidamente con una cantidad mínima de codificación en cualquier tipo de aplicación.

MQTT (2022) nos dice que, el protocolo MQTT funciona en base al modelo de publicación/suscripción, en vez de comunicarse directamente como tradicionalmente se hace, para desacoplar al remitente del mensaje (publicador) del receptor del mensaje (suscriptor). Este tercer componente, llamado broker, maneja la comunicación entre publicadores y suscriptores (clientes). La tarea del broker es filtrar todos los mensajes entrantes de los publicadores y distribuirlos correctamente a los suscriptores. El broker desacopla a los publicadores y suscriptores de la siguiente manera:

- **Desacoplamiento espacial:** El publicador y el suscriptor no están al tanto de la ubicación de red del otro y no intercambian información como direcciones IP o números de puerto.
- **Desacoplamiento temporal:** El publicador y el suscriptor no se ejecutan o tienen conectividad de red al mismo tiempo.
- **Desacoplamiento de sincronización:** Tanto los publicadores como los suscriptores pueden enviar o recibir mensajes sin interrumpirse entre sí. Por ejemplo, el suscriptor no tiene que esperar a que el publicador envíe un mensaje.

Además, define a los clientes y los brokers como:

- **Cliente MQTT:** es cualquier dispositivo, desde un servidor hasta un microcontrolador que ejecuta una biblioteca MQTT. Si el cliente está enviando mensajes, actúa como un publicador, y si está recibiendo mensajes, actúa como un receptor.
- **Broker MQTT:** es el sistema de backend que coordina los mensajes entre los diferentes clientes. Las responsabilidades del broker incluyen recibir y filtrar mensajes, identificar los clientes suscritos a cada mensaje y enviarles los mensajes. También es responsable de otras tareas, como:
 - Autorizar y autenticar clientes MQTT
 - Enviar mensajes a otros sistemas para su análisis adicional
 - Manejar mensajes perdidos y sesiones de clientes
- **Conexión MQTT:** los clientes y los brokers comienzan a comunicarse usando una conexión MQTT. Los clientes inician la conexión enviando un mensaje CONNECT al broker MQTT. El broker confirma que se ha establecido una conexión respondiendo con un mensaje CONNACK. Tanto el cliente MQTT como el broker requieren una pila TCP/IP para comunicarse. Los clientes nunca se conectan entre sí, solo con el broker.

4. Marco conceptual

- Nube: Es un término utilizado para describir una red global de servidores, cada uno con una función única. No es una entidad física, sino más bien una vasta red de servidores remotos en todo el mundo que están conectados y diseñados para operar como un ecosistema único. Estos servidores están diseñados para almacenar y administrar datos, ejecutar aplicaciones o proporcionar contenido o un servicio, como la transmisión de videos, correo electrónico web, software de productividad de oficina o redes sociales. En lugar de acceder a archivos y datos desde una computadora local o personal, los accedes en línea desde cualquier dispositivo con capacidad de Internet (Microsoft Azure, 2023).
- Dashboard: Un dashboard es una herramienta que permite la gestión de información mediante la monitorización, análisis y visualización de los Indicadores Clave de Desempeño (KPI, por sus siglas en ingles), métricas y datos fundamentales necesarios para realizar un seguimiento del estado de una empresa, departamento, campaña o proceso específico. Es posible considerar el dashboard como un tipo de "resumen" que recopila datos de diversas fuentes en un solo lugar y los presenta de una manera fácil de comprender, permitiendo destacar la información más relevante (Ortiz, 2023) .
- IoT: El Internet de las cosas, o IoT, es un sistema de dispositivos informáticos interrelacionados, máquinas mecánicas y digitales, objetos, animales o personas que cuentan con identificadores únicos (UID) y la capacidad de transferir datos a través de una red sin necesidad de una persona a otra (S. Gillis, 2023).

5. Hipótesis

La implementación de un sistema de monitoreo basado en el sensor BME680 y el microcontrolador ESP32 nos permitirá medir parámetros como el Índice de Calidad del Aire (ICA), $PM_{2.5}$ (COV), la temperatura y la humedad del aire. Al conectar el sistema a la nube, podremos obtener un registro histórico de datos y observar el comportamiento de la contaminación.

6. Variables

6.1. Variable dependiente:

- Histórico de los valores medidos de la calidad del aire.

6.2. Variable independiente:

- Sistema de monitoreo en base al sensor BME680 y al microcontrolador ESP32, con conexión a la nube

6.3. Operacionalización de las Variables

Tabla 4

Variable Independiente

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento
Sistema de monitoreo en base al sensor BME680 y al microcontrolador ESP32, con conexión a la nube	Temperatura	Cambio de temperatura con respecto ambiente	T (C°)	Dispositivo BME680
	Humedad	Variación de la humedad relativa del aire	H (%)	Dispositivo BME680
	ICA	Escala de peligrosidad de contaminación del aire	ICA (0- >500)	Escala ICA
	PM _{2.5}	Cantidad de compuestos orgánicos volátiles en el aire	COV equivalente	Dispositivo BME680

Tabla 5*Variable Dependiente*

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento
Histórico de los valores medidos de la calidad del aire	Temperatura	Cambio de temperatura con respecto ambiente	T (C°)	Dispositivo BME680
	Humedad	Humedad relativa del aire	H (%)	Dispositivo BME680
	ICA	Escala de peligrosidad de contaminación del aire	ICA (0->500)	Escala ICA

7. Materiales y Procedimientos

7.1. Población

Estado de la atmósfera del distrito de Trujillo.

7.2. Muestra

Estado de la atmósfera en la calle Villalobos 644 de la urbanización Primavera del distrito de Trujillo en el mes de marzo.

7.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos

- **Técnica:** Monitoreo continuo
- **Instrumento:** Dispositivo BME680 y Escala ICA

7.4. Diseño de Contrastación

El diseño a aplicar es preexperimental, como se explica en la Figura 3:

Figura 3

Relación de contratación



Nota. **G:** Grupo experimental: Urbanización de Palermo

X: Experimento: Sistema de monitoreo en base al sensor BME680 y al microcontrolador ESP32.

O: Datos posprueba: Índice de Calidad del Aire (ICA), PM_{2.5} (COV), la temperatura y la humedad.

7.4.1. Desarrollo de Sistema para Obtención de Datos

El diagrama de bloques de la Figura 4, muestra la perspectiva general del sistema a desarrollar, donde se muestra el recorrido que tomarán los datos.

Figura 4

Diagrama de solución general



A. Adquisición de Datos

El primer paso para lograr la solución propuesta sería, como se muestra en la Figura 4, la captura de hasta seis datos de la atmosfera de la ciudad Trujillo por el sensor (BME680), específicamente en la calle

Villalobos 644 de la urbanización Primavera, ver anexo C. Estos datos obtenidos se enviarán al microcontrolador (ESP32), en forma de señales, que estará conectado al sensor mediante protocolos de comunicación I2C (por sus siglas en inglés, Inter-Integrated Circuit) o SPI (por sus siglas en inglés, Serial Peripheral Interface), ver Figura 5; el protocolo que se usará será el SPI. El microcontrolador decodificará las señales que mediante programación se convertirán en datos legibles para determinar la calidad de sus niveles medidos con la ayuda de estándares de calidad del aire internacionales.

El microcontrolador tiene diversas formas de interconexión (Wi-Fi, USB, Bluetooth, BLE), la conexión mediante la red WLAN nos permitirá un mejor manejo del sistema para su ubicación y un mayor alcance.

Figura 5

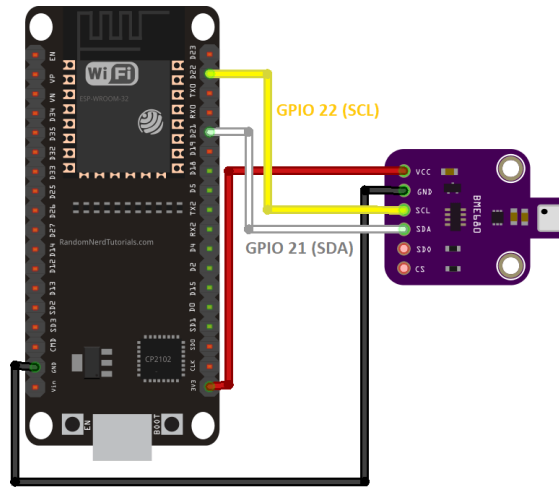
Esquema para la adquisición de datos



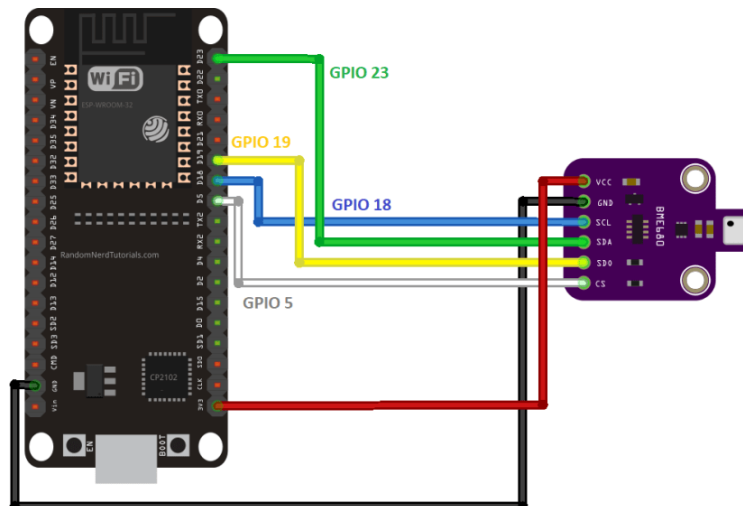
Figura 6

Protocolos de comunicación I2C y SPI

a)



b)



Nota. a) Protocolo de comunicación I2C, b) Protocolo de comunicación SPI, replicado de *ESP32: BME680 Environmental Sensor using Arduino IDE*, por Random Nerd Tutorials, 2023, Random Nerd Tutorials (<https://randomnerdtutorials.com/esp32-bme680-sensor-arduino/>)

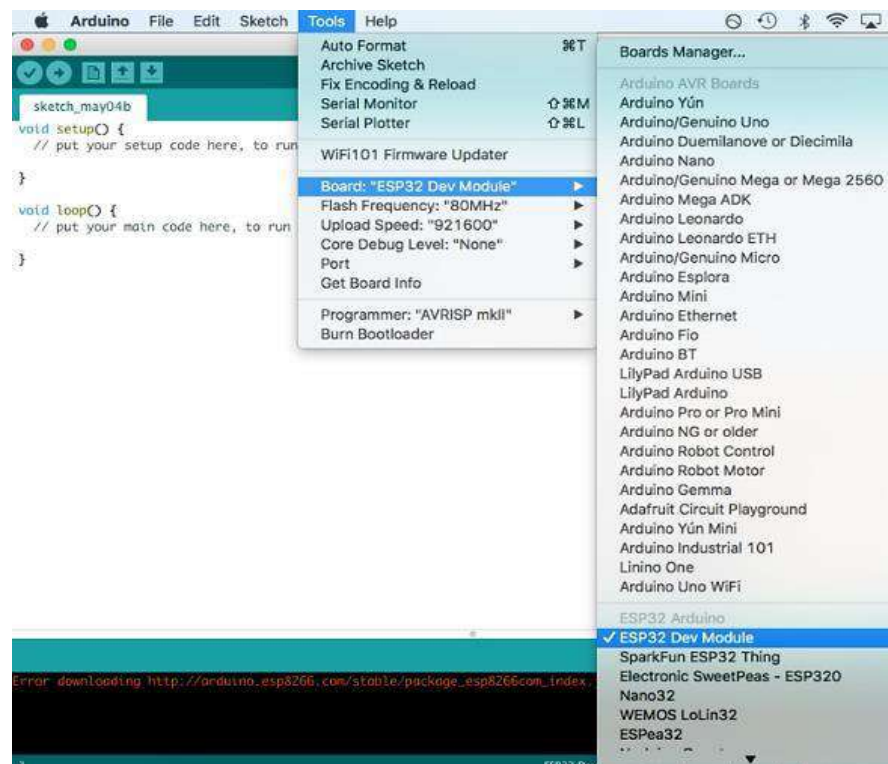
B. Procesamiento de Datos

En este apartado se conecta el microcontrolador con un computador con la finalidad de identificar, ordenar y procesar los datos que vienen desde el sensor. Todo se logra a través del software IDE de Arduino, este permite programar al microcontrolador de acuerdo a parámetros para la obtención de datos con un bajo índice de error, ver código en el anexo B.

Para hacer compatible la conexión se instala la librería ESP32 en IDE de Arduino. Luego se selecciona el módulo de desarrollo ESP32 desde Tools, ver Figura 6. Además, debemos poder comunicarnos con el ESP32, seleccionado la ubicación de comunicación del puerto apropiado, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

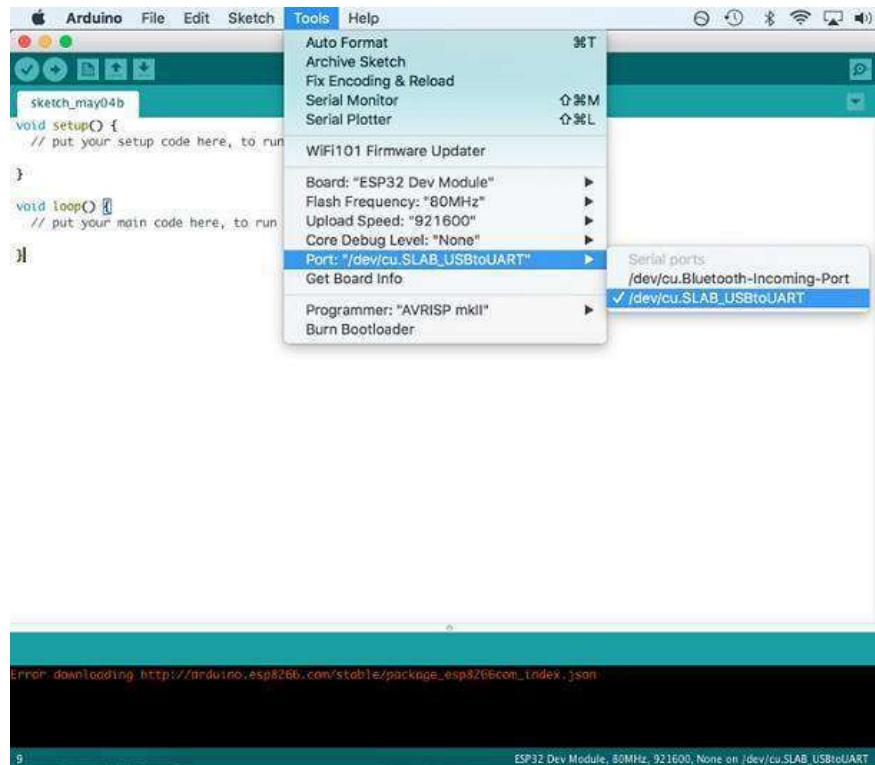
Selección de módulo



Nota. Replicado de *Connect an ESP32-DevKitC to Ubidots over MQTT*, por Isabel Lopez, 2023, Ubidots Help Center (<https://help.ubidots.com/en/articles/748067-connect-an-esp32-devkitc-to-ubidots-over-mqtt>)

Figura 8

Selección de puerto



Nota. Replicado de *Connect an ESP32-DevKitC to Ubidots over MQTT*, por Isabel Lopez, 2023, Ubidots Help Center (<https://help.ubidots.com/en/articles/748067-connect-an-esp32-devkitc-to-ubidots-over-mqtt>)

De acuerdo a la plataforma en nube a usar hay diferentes protocolos de comunicación, en este caso con UBIDOTS usaremos el protocolo de red MQTT.

C. Transmisión de Datos

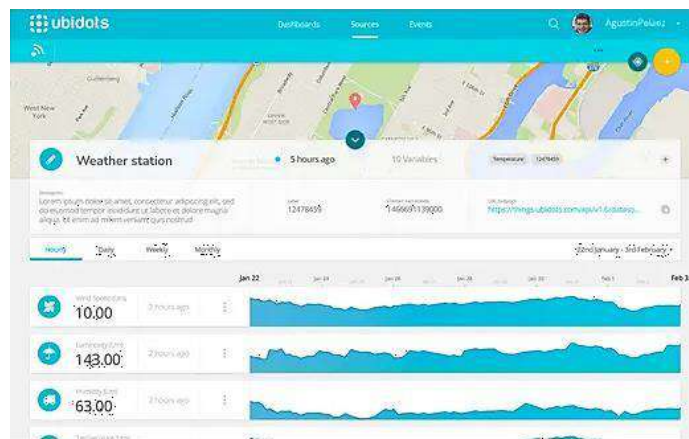
Para establecer la comunicación es necesario descargar e instalar la librería PubSubClient y Ubidots ESP MQTT en el IDE de Arduino. Además de la librería BSEC desarrollada por la compañía BOSCH, esta se ha conceptualizado para proporcionar un procesamiento y una

fusión de señales de mayor nivel para el BME680. Procesa las señales BME680 para proporcionar las salidas de sensor solicitadas.

Utilizando la plataforma UBIDOTS, ver figura 8, podemos enviar datos a la nube desde cualquier dispositivo con acceso a Internet. MQTT es un protocolo ligero para dispositivos IoT. MQTT permite enviar comandos para regular las salidas, leer datos no publicados del nodo del sensor, etc. Por lo tanto, hace que sea muy fácil establecer comunicación entre múltiples dispositivos.

Figura 9

Plataforma UBIDOTS



Nota. Replicado de *Powerful but simple Industrial IoT*, por Ubidots, 2023, Ubidots (<https://ubidots.com/>)

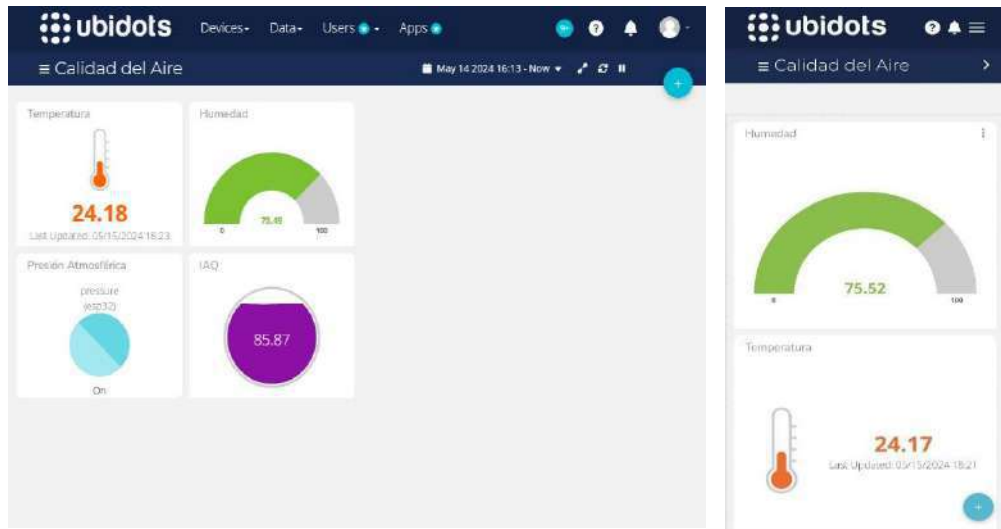
D. Monitoreo

El tablero de UBIDOTS mostrará los datos del sensor en tiempo real en un dashboard, diseñado por nosotros. El ESP32 se conecta a la red WiFi y mediante la clave API de UBIDOTS, los datos ambientales se cargan en el panel de control de UBIDOTS después de un intervalo fijo. Además, cada dato se muestra en un diagrama para tener un mejor análisis. Ver figura 9.

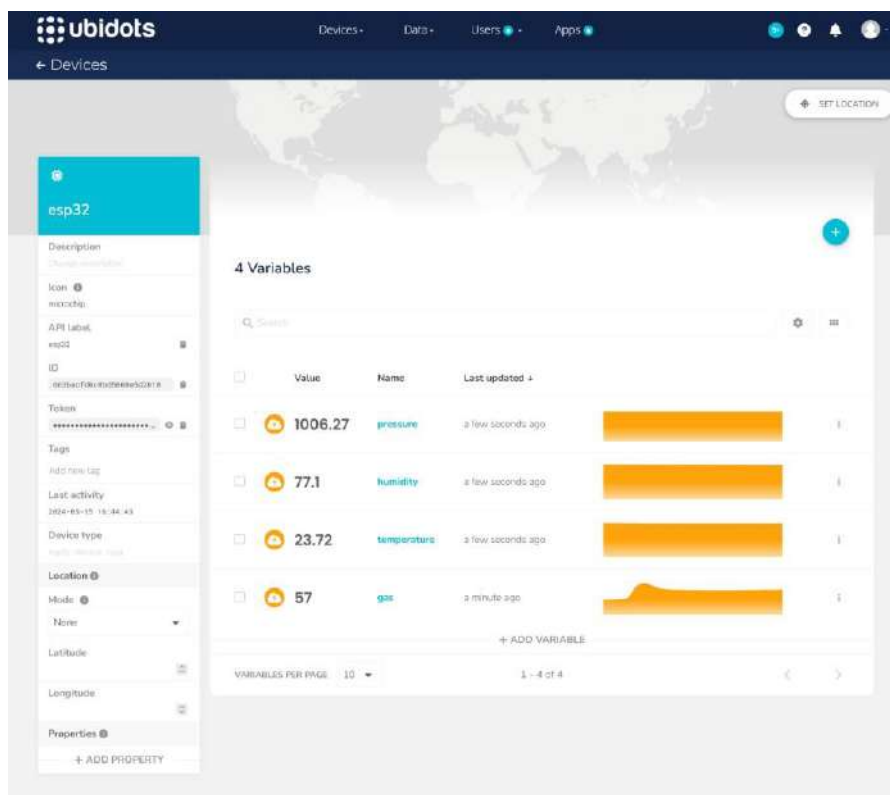
Se puede acceder al tablero desde la computadora o usando un teléfono inteligente desde cualquier parte del mundo.

Figura 10
Dashboard en UBIDOTS

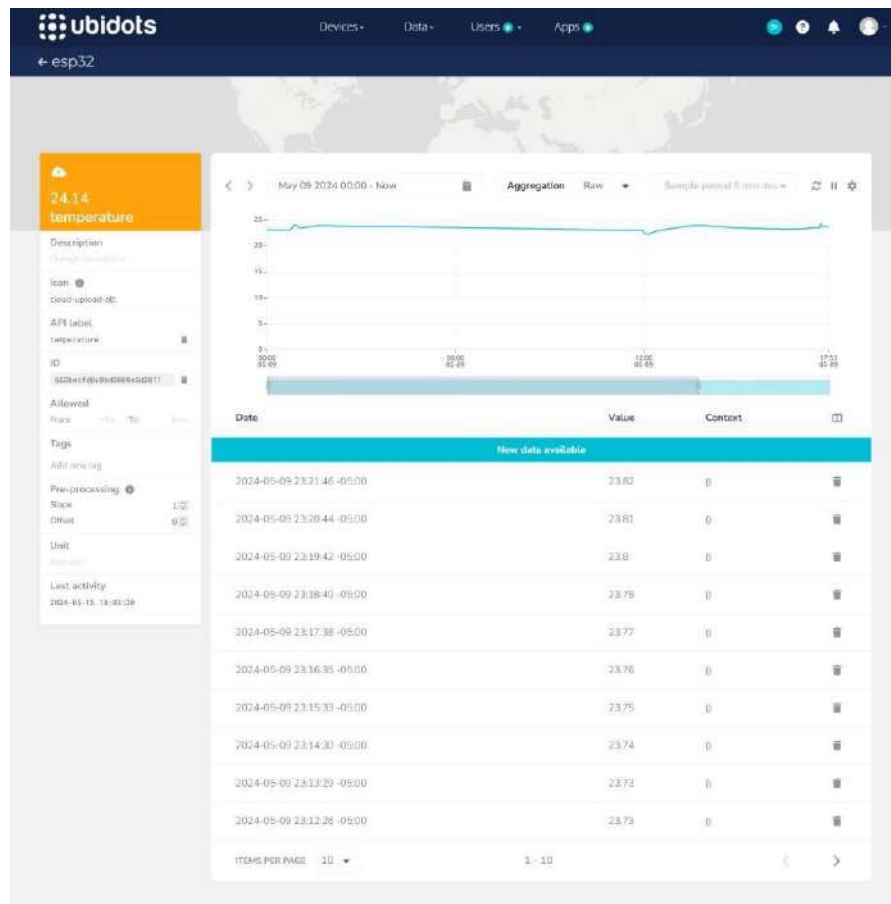
a)



b)



c)



Nota. a) Dashboard BME680 en computadora y en celular, b) Panel de datos y C) Diagrama del indicador Temperatura.

La plataforma de UBIDOTS nos facilita el acceso al historial de datos gracias a su sincronización con Google sheets, donde podemos visualizar y recopilar nuestros datos usando la extensión de Apps script, como se muestra en la figura 10.

Figura 11

Recopilación de datos en Google sheets

a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
10	9/5/2024 20:34:25	23.84	76.26	100.24							
11	9/5/2024 20:33:23	23.85	76.25	99.88							
12	9/5/2024 20:32:20	23.85	76.34	100.42							
13	9/5/2024 20:31:18	23.84	76.35	99.35							
14	9/5/2024 20:30:15	23.84	76.33	100.24							
15	9/5/2024 20:29:13	23.84	76.29	100.18							
16	9/5/2024 20:28:10	23.84	76.33	100.12							
17	9/5/2024 20:27:06	23.83	76.37	99.58							
18	9/5/2024 20:26:05	23.83	76.36	99.64							
19	9/5/2024 20:25:03	23.84	76.32	99.54							
20	9/5/2024 20:24:00	23.84	76.31	99.46							
21	9/5/2024 20:22:58	23.85	76.31	100.24							
22	9/5/2024 20:20:55	23.84	76.33	100							
23	9/5/2024 20:19:54	23.84	76.39	100							
24	9/5/2024 20:18:51	23.85	76.4	99.52							
25	9/5/2024 20:17:49	23.85	76.42	100.12							
26	9/5/2024 20:16:46	23.85	76.55	99.58							
27	9/5/2024 20:15:44	23.86	76.35	99.54							
28	9/5/2024 20:14:41	23.86	76.37	100.12							
29	9/5/2024 20:13:39	23.86	76.37	99.94							
30	9/5/2024 20:12:37	23.87	76.35	100.36							
31	9/5/2024 20:11:35	23.87	76.4	99.64							

b)

```
AppScript Sensor BME680
Implementar

Archivos Código.gs Bibliotecas Servicios
Ejecutar Depuración onOpen Registro de ejecución

1 //Replace the following constants with your Ubidots Token and the Variable(s) you wish to retrieve.
2
3 var TOKEN = "BBUS-56gt18ee2d0c10fzErP8sar2cy4"
4 var URL = "http://industrial.api.ubidots.com/api/v1.6/"
5 var DEVICE_ID = "663becf8bc8bd5808e522019"
6 var VARIABLE_ID1 = "663becf8bc8bd5808e522011"
7 var VARIABLE_ID2 = "663becf8bc8bd5808e522012"
8 var VARIABLE_ID3 = "663becf8bc8bd5808e522013"
9
10 var NUMBER_OF_VALUES = "200" // Number of values to retrieve from the variable.
11 var VARIABLE_SHEET = "Variables" // Name of the sheet where the variables values will be store.
12 var VALUES_SHEET = "Values" // Name of the sheet where the values from the variable will be store.
13 function onOpen() {
14   var sheet = SpreadsheetApp.getActive();
15
16   var menuItems = [
17     {name: 'Get Ubidots Variables', functionName: 'get_ds_variables'},
18     {name: 'Get Data', functionName: 'get_variable_data'}
19   ];
20
21   sheet.addMenu('Ubidots', menuItems);
22 }
23
24 function get_ds_variables(){
25
26   var sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().getSheetByName(VARIABLE_SHEET);
27
28   if (sheet != null) {
29     SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().deleteSheet(sheet);
30   }
31
32   sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().insertSheet();
33   sheet.setName(VARIABLE_SHEET);
34 }
```

Nota. a) Datos en Google sheets y b) Código en Apps Script

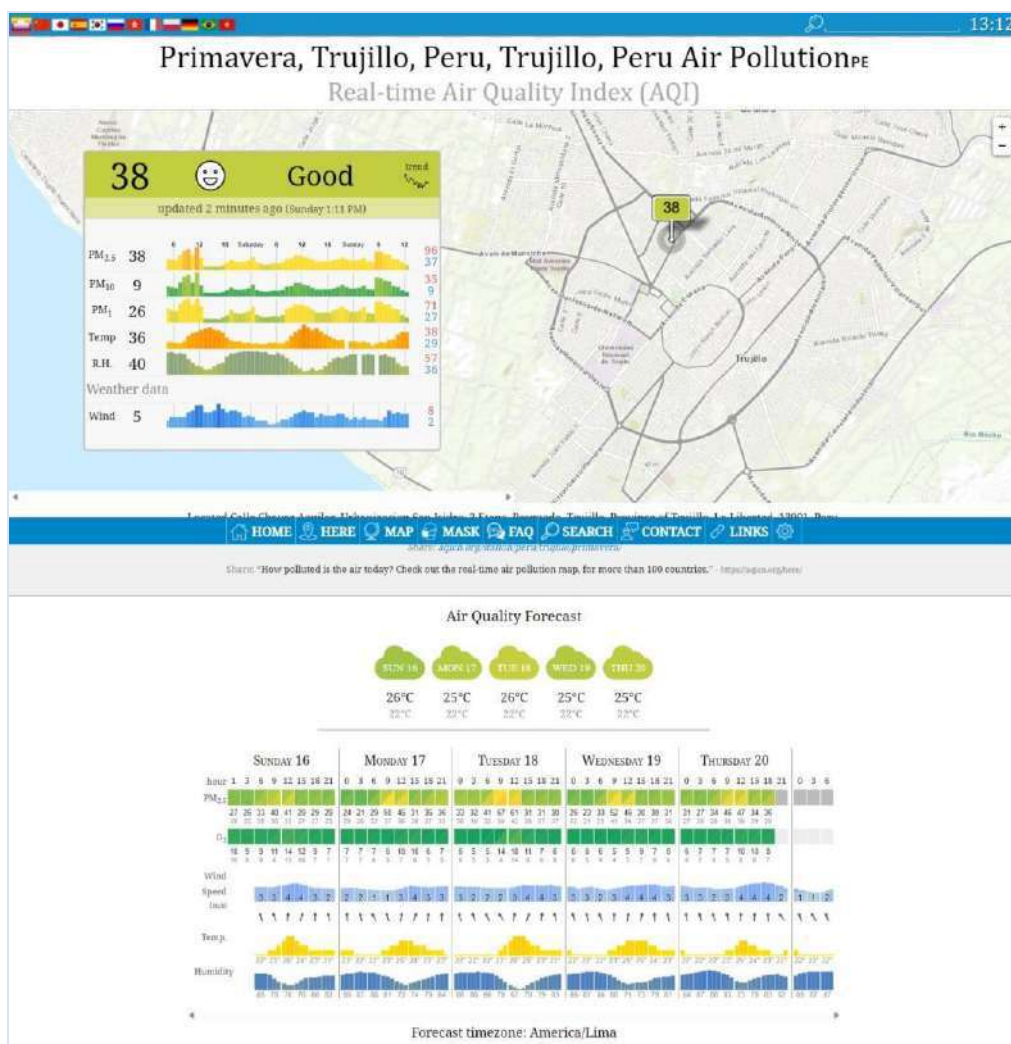
7.4.2. Recopilación de Datos Waqi y SENAMHI

Los datos de Waqi y SENAMHI se obtendrán a través de sus propias plataformas.

En el caso de Waqi se tomarán los datos de la Temperatura, Humedad, ICA y PM_{2.5} (COV), como se muestra en la Figura 9.

Figura 12

Plataforma Waqi

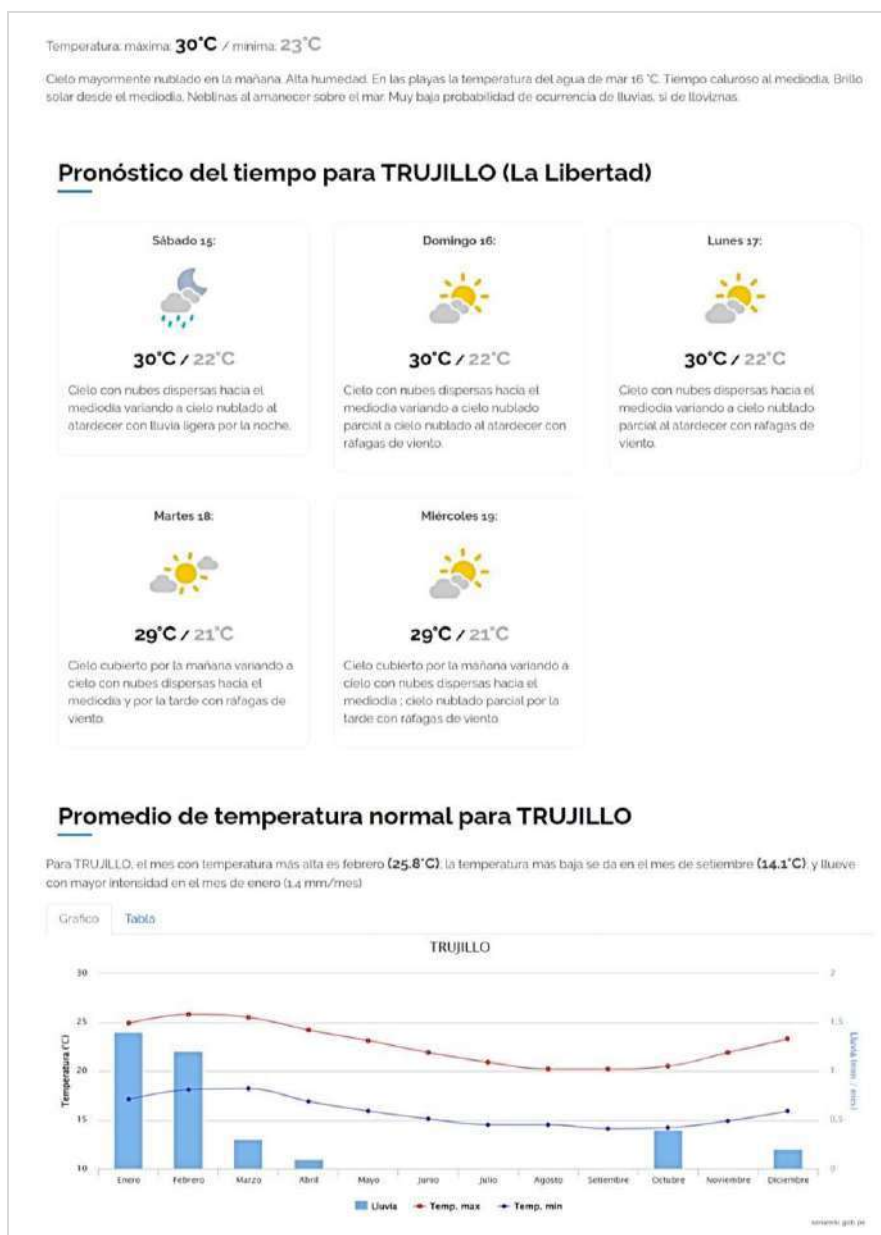


Nota. Replicado de *Primavera, Trujillo, Peru, Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI)*, por Waqi, 2023, World's Air Pollution (<https://aqicn.org/station/peru/trujillo/primavera/#/z/13.8>)

Para el caso de SENAMHI, los únicos datos que nos proporciona son Temperatura y Humedad, en picos máximos y mínimos diarios, como se muestra en la Figura 10.

Figura 13

Plataforma SENAMHI



Nota. Replicado de *Pronóstico La Libertad*, por SENAMHI, 2022, SENAMHI (<https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle-turistico&localidad=0005#normaltabla>)

7.5. Procesamiento y análisis de datos

Después de haber realizado la medición de la calidad del aire con el sensor construido, se procederá a realizar el análisis de los datos

tanto de los obtenidos de nuestro prototipo como los procedentes de Waqi y SENAMHI, ver anexo A.

Los datos que recogidos son: Temperatura, Humedad, ICA y PM_{2.5} (COV). La toma de datos se hizo cada 6 horas durante un mes, empezando el 23/02/2024 hasta el 24/03/2024 dentro del urbanización Primavera de la ciudad de Trujillo.

Los resultados obtenidos serán comparados en una tabla para ver la diferencia y el margen de variación porcentual. Posteriormente se graficará y analizará la diferencia de ambos sensores.

Se tiene la evaluación de 3 sensores:

- Waqi
- SENAMHI
- BME 32
- BME 866

Se evaluó los siguientes datos climáticos:

- Temperatura (°C)
- Humedad Relativa (HR)
- Compuestos orgánicos volátiles (PM_{2.5})

Se obtuvieron datos de la siguiente manera:

- 8 evaluaciones al día (12am - 9pm) cada 3 horas
- 30 días de evaluación (23/02 - 23/03)

El análisis se realizará se en dos partes, Descriptivo (Series de Tiempo) e Inferencial (Prueba de Bondad de ajuste). Para la prueba de bondad de ajuste se utilizará los métodos de Kolgomorov, distancia de Cramér-von Mises y Wasserstein.

Estos métodos fueron seleccionados de acuerdo con los métodos examinados para evaluar y cuantificar la confiabilidad en tiempo real de las estaciones de Waqi. De la misma manera, se utilizará para

determinar cuáles de los sensores tienen menos diferencia y cuánta es la diferencia con el sensor de la estación Waqi (AQICN, 2020).

7.5.1. Sensores BME vs Waqi

A. Análisis Descriptivo

Tabla 7

Cuadro Resumen por Estación y Tipo de Dato Climatológico (BME's vs Waqi)

Dato	Sensor	Promedio	DesvStd	Cv	Registros
Humedad	BME 32	69.26	4.076	5.885	240
Humedad	BME 866	74.15	5.967	8.048	240
Humedad	Waqi	49.2	7.901	16.06	240
PM	BME 32	41.31	13.15	31.83	240
PM	BME 866	41.31	13.15	31.84	240
PM	Waqi	41.02	13	31.7	240
Temperatura	BME 32	29.1	1.064	3.655	240
Temperatura	BME 866	26.29	1.409	5.36	240
Temperatura	Waqi	31.06	3.542	11.4	240

Interpretaciones:

- Respecto a la humedad: se observa que los registros del sensor Waqi se encuentran más dispersos (7.9 puntos porcentuales con respecto a su promedio).
- Respecto a la calidad de aire: todas las estaciones tienen una variación de 13 puntos respecto al valor promedio, cabe mencionar que los registros son heterogéneos ($Cv > 30\%$)
- Respecto a la temperatura: se observa que los registros del sensor Waqi se encuentran más dispersos (3.54 °C con respecto a su promedio).

Gráficos Descriptivos:

a) Temperatura

Figura 14

Temperatura por Día-Hora

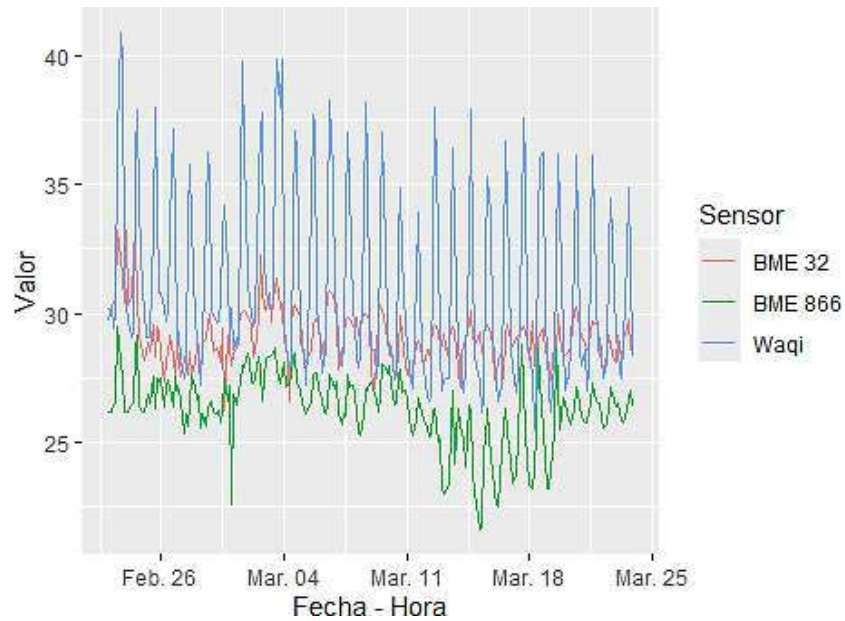
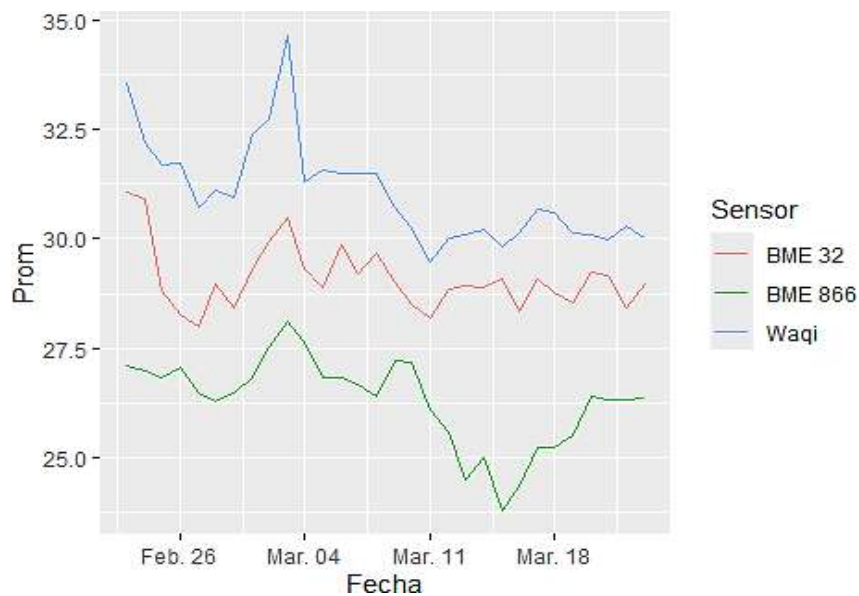


Figura 15

Temperatura Promedio - Día



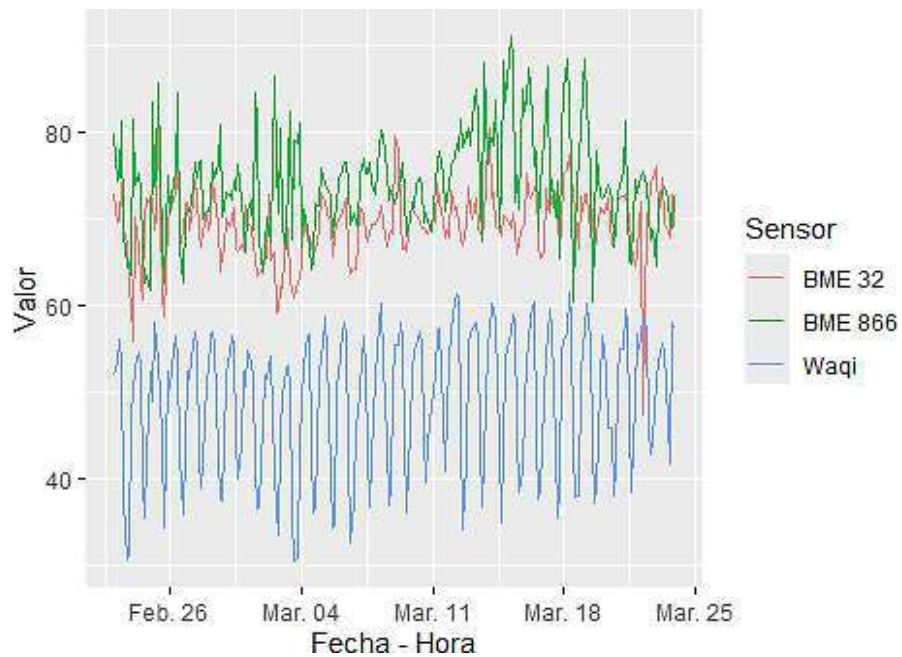
Se ha detectado una discrepancia significativa en las lecturas del sensor Waqi en comparación con los otros sensores. Esto se debe a una calibración incorrecta del sensor Waqi en lo que respecta a la temperatura. Por otro lado, el sensor BME32 registra valores más

elevados que el sensor BME 866 debido a su ubicación en el exterior de la vivienda, mientras que el otro se encuentra en el interior bajo sombra.

b) Humedad Relativa

Figura 16

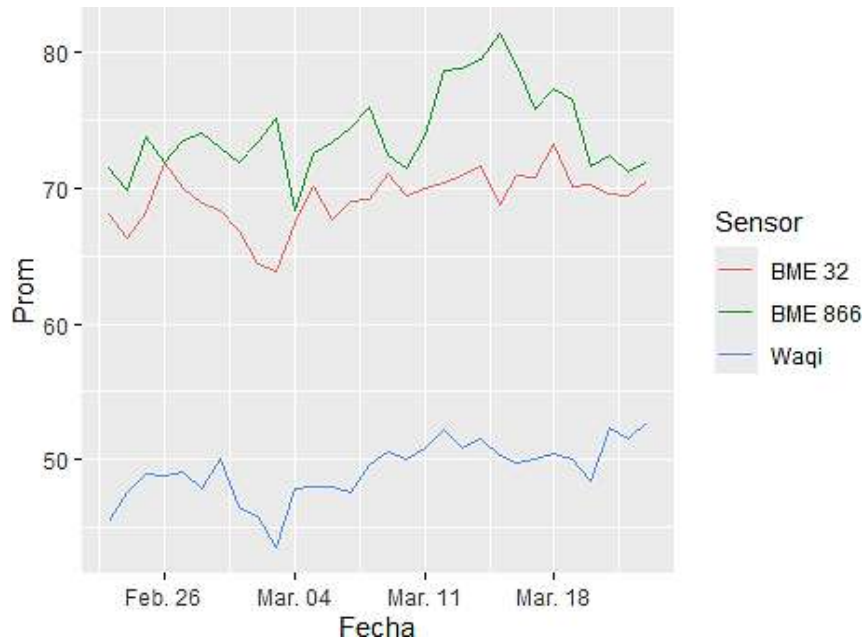
Humedad relativa por Día-Hora



Se observa que el sensor Waqi, arroja valores más bajos por hora que los otros sensores, el comportamiento de los otros dos sensores son similares.

Figura 17

Humedad promedio Día



Se observa que el sensor Waqi, arroja valores promedio por día más bajos que los otros sensores.

c) Compuestos orgánicos volátiles (PM_{2.5})

Figura 18

Compuestos orgánicos por Día - Hora

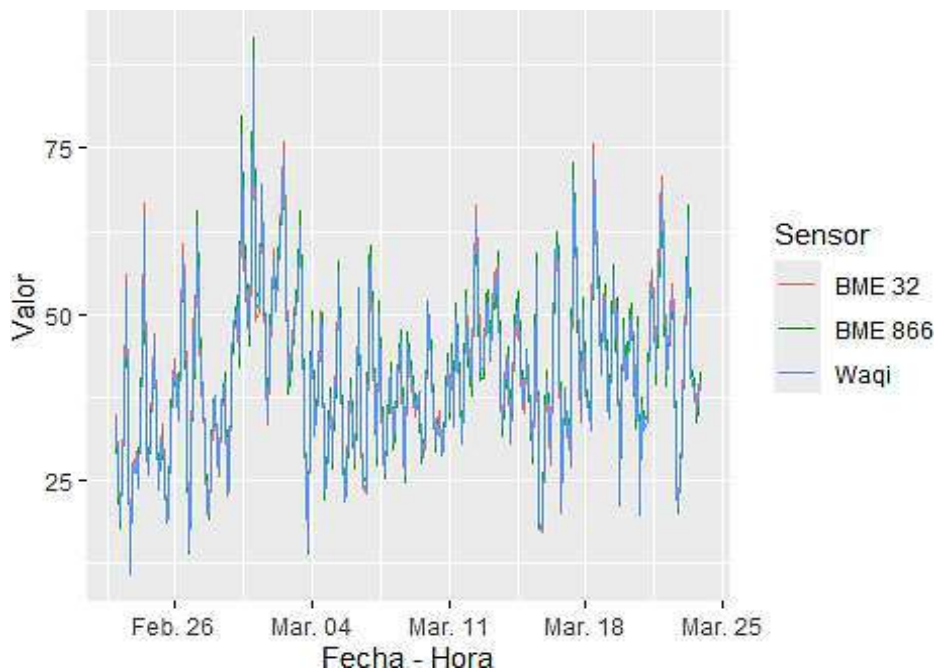
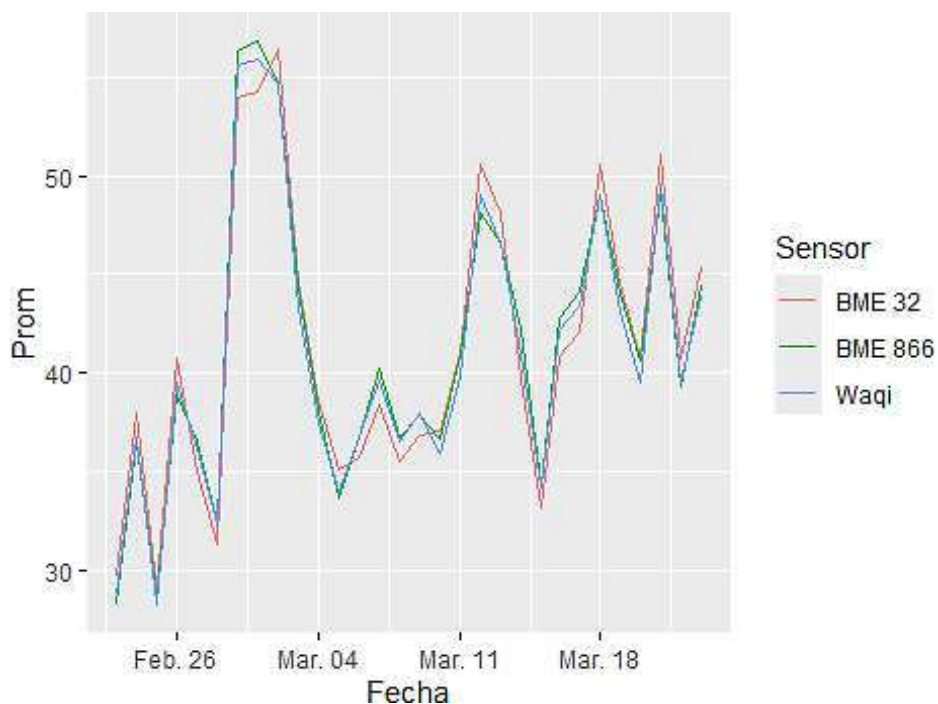


Figura 19

Compuestos orgánicos promedio - Día



Se observa que los valores arrojados respecto a los compuestos orgánicos volátiles, por los tres sensores son similares.

B. Análisis Inferencial

a) Compuestos orgánicos volátiles (PM_{2.5}):

- **Prueba de Normalidad**

Se realizarán pruebas de normalidad para decidir qué tipo de prueba ejecutar, con el fin de evaluar el ajuste de los datos proporcionados por los sensores.

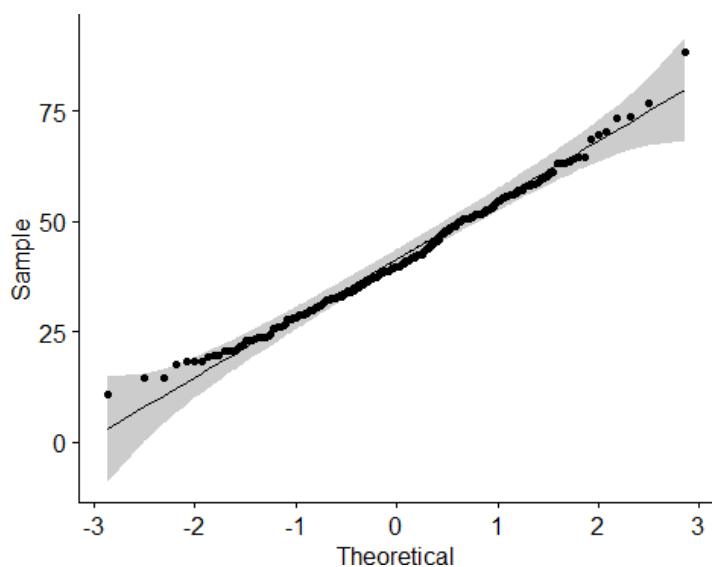
Estación Waqi

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9887	0.05576

Figura 20

Grafica SW Waqi COV



Los datos de los compuestos orgánicos volátiles (PM2.5) de Waqi siguen una distribución normal.

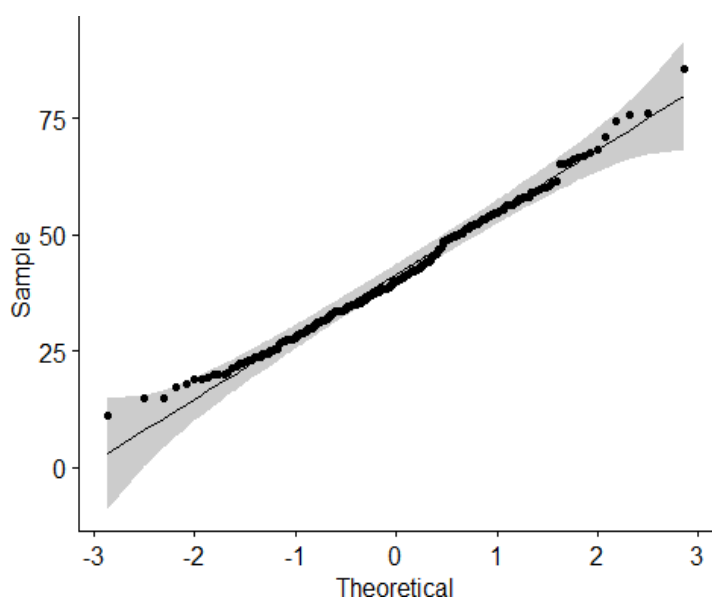
Estación BME 32

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9885	0.05235

Figura 21

Grafica SW BME32 COV



Los datos de los compuestos orgánicos volátiles (PM2.5) del BME 32 siguen una distribución normal.

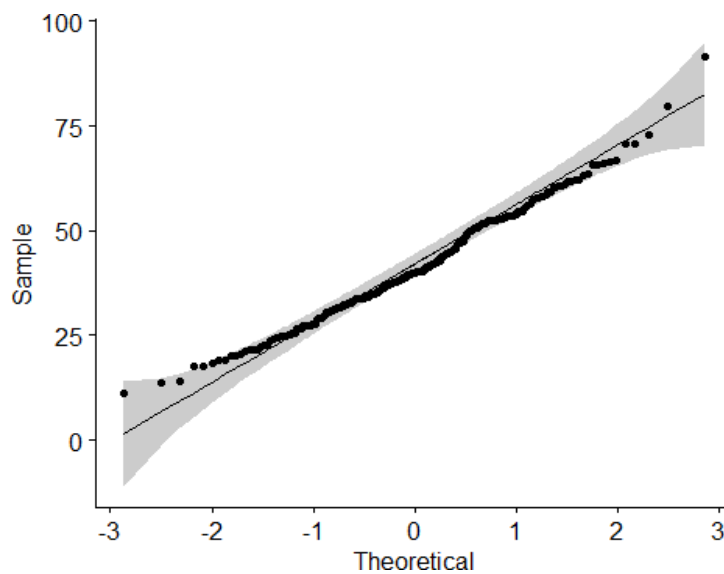
Estación BME 866

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9866	0.02422 *

Figura 22

Grafica SW BME866 COV



Los datos de los compuestos orgánicos volátiles (PM2.5) del BME 866 no siguen una distribución normal.

Dado que dos de las estaciones cumplen el supuesto de normalidad aplicaremos una prueba ANOVA, pero también aplicaremos las otras 3 pruebas de bondad de ajuste.

- **Prueba Anova**

Modelo de Análisis de Varianza

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sensor	2	13.75	6.873	0.04004	0.9608
Residuals	717	123068	171.6	NA	NA

Dado que la probabilidad del estadístico $F[\text{pr}(>F)]$ es mayor a 0.05, concluimos que no existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Prueba de ajuste de Kolgomorov**

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME32

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = wq$ $y = bm32$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 240$ $n.y = 240$
Estadístico de Prueba:	$ks = 0.04166667$
Parámetros del Estadístico:	$n = 240$ $m = 240$
Valor P:	0.9852795
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'wq' no es igual a la cdf de 'bm32'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME68

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = wq$ $y = bm866$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 240$ $n.y = 240$

Estadístico de Prueba:	$ks = 0.04583333$
Parámetros del Estadístico:	$n = 240$
	$m = 240$
Valor P:	0.9625999
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'wq' no es igual a la cdf de 'bm866'.

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es mayor a 0.05, concluimos que no existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Distancia de Cramer Von Misses**

- **Waqi vs BME 32**

Test Stat: 0.07175347

P-Valor: 0.99950000

- **Waqi vs BME 866**

Test Stat: 0.09953125

P-Valor: 0.98900000

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es mayor a 0.05, concluimos que no existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Distancia de Wasserstein**

- **Waqi vs BME 32**

Test Stat: 0.4864325

P-Valor: 1.0000000

- **Waqi vs BME 866**

Test Stat: 0.5355417

P-Valor: 1.0000000

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es mayor a 0.05, concluimos que no existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

b) Temperatura:

- **Prueba de Normalidad**

Se realizarán pruebas de normalidad para decidir qué tipo de prueba ejecutar, con el fin de evaluar el ajuste de los datos proporcionados por los sensores.

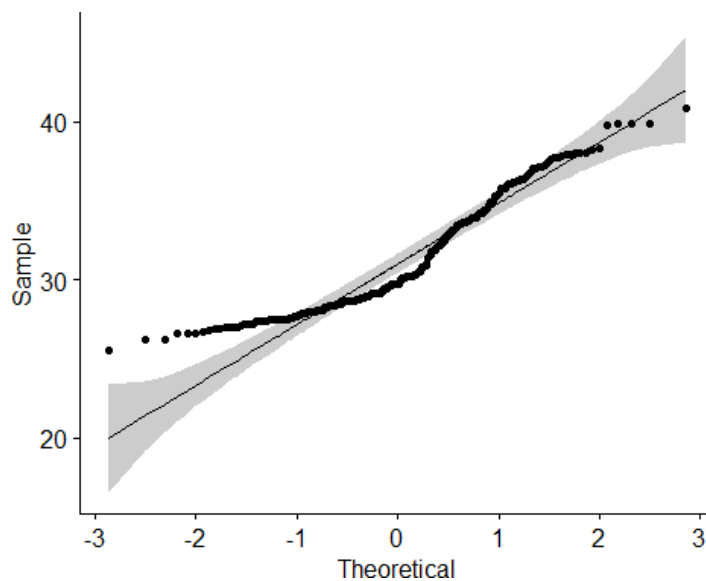
Estación Waqi

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9085	6.052e-11

Figura 23

Grafica SW Waqi Temp.



Los datos de Temperatura de Waqi no siguen una distribución normal.

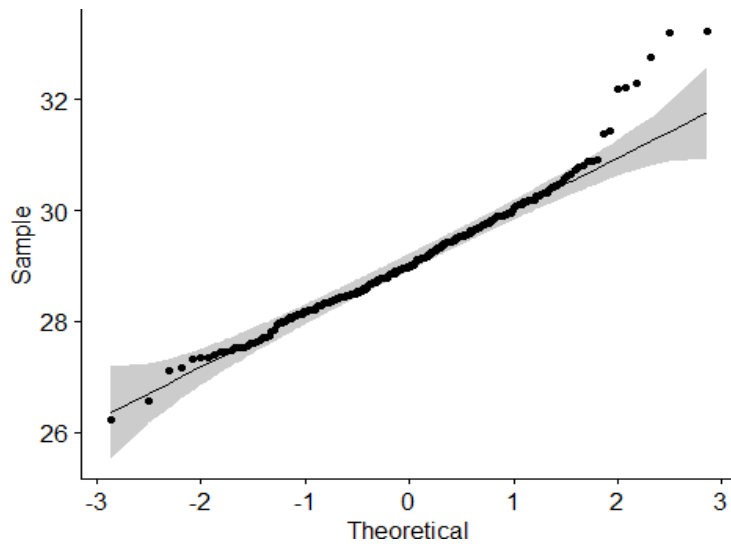
Estación BME 32

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9609	4.041e-06

Figura 24

Grafica SW BME32 Temp.



Los datos de Temperatura del BME 32 no siguen una distribución normal.

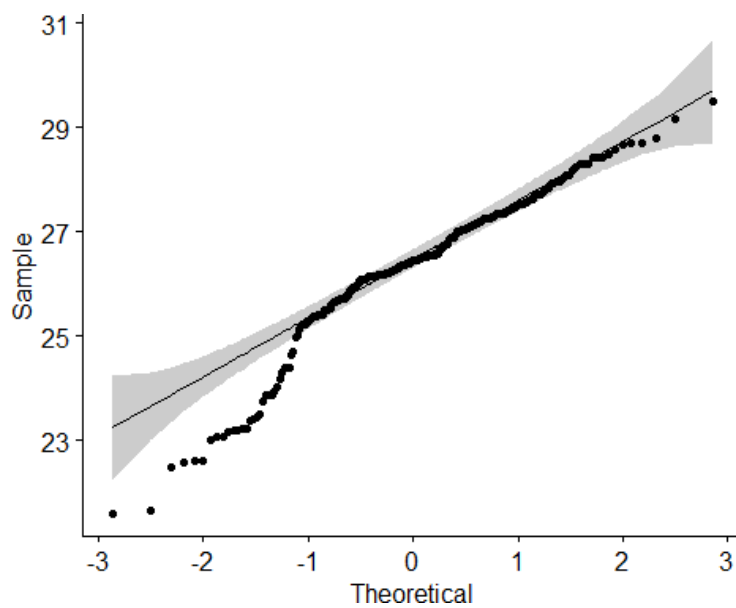
Estación BME 866

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9412	3.076e-08

Figura 25

Grafica SW BME866 Temp.



Los datos de Temperatura del BME 866 no siguen una distribución normal. Dado que las 3 estaciones no cumplen el supuesto de normalidad aplicaremos 3 pruebas de bondad de ajuste.

- **Prueba Anova**

Modelo de Análisis de Varianza

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sensor	2	2754	1377	263.8	1.396e-86
Residuals	717	3743	5.22	NA	NA

Dado que la probabilidad del estadístico $F[\text{pr}(>F)]$ es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Prueba de ajuste de Kolgomorov**

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME32

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = wq$ $y = bm32$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 240$ $n.y = 240$
Estadístico de Prueba:	$ks = 0.3583333$
Parámetros del Estadístico:	$n = 240$ $m = 240$
Valor P:	$8.271162e-14$
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'wq' no es igual a

la cdf de 'bm32'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME68

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = wq$ $y = bm866$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 240$ $n.y = 240$
Estadístico de Prueba:	$ks = 0.7416667$
Parámetros del Estadístico:	$n = 240$ $m = 240$
Valor P:	0
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'wq' no es igual a la cdf de 'bm866'.

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que sí existen diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Distancia de Cramer Von Misses**

Waqi vs BME 32

Test Stat: 16.92344

P-Valor: 0.00025

Waqi vs BME 866

Test Stat: 119.24047

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Distancia de Wasserstein**

- **Waqi vs BME 32**

- Test Stat: 2.168167

- P-Valor: 0.000250

- **Waqi vs BME 866**

- Test Stat: 4.764833

- P-Valor: 0.000250

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

c) Humedad Relativa:

- **Prueba de Normalidad**

Se realizarán pruebas de normalidad para decidir qué tipo de prueba ejecutar, con el fin de evaluar el ajuste de los datos proporcionados por los sensores.

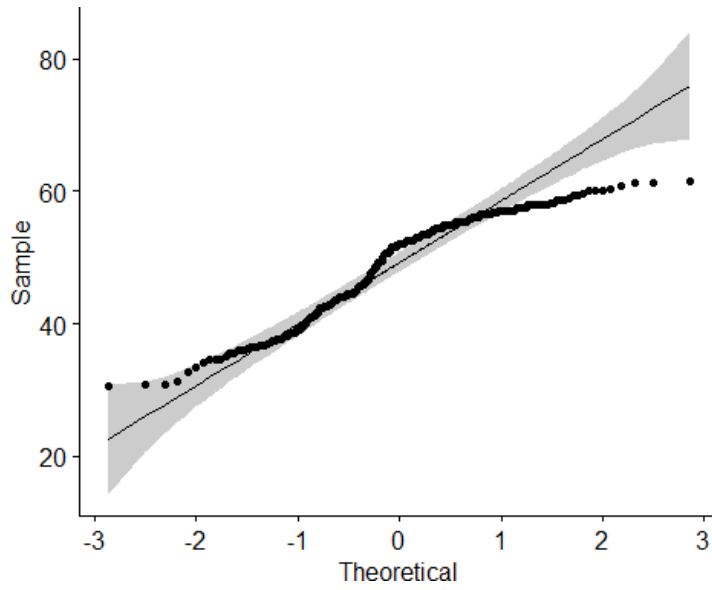
Estación Waqi

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9287	2.294e-09

Figura 26

Grafica SW Waqi HR



Los datos de Humedad de Waqi no siguen una distribución normal.

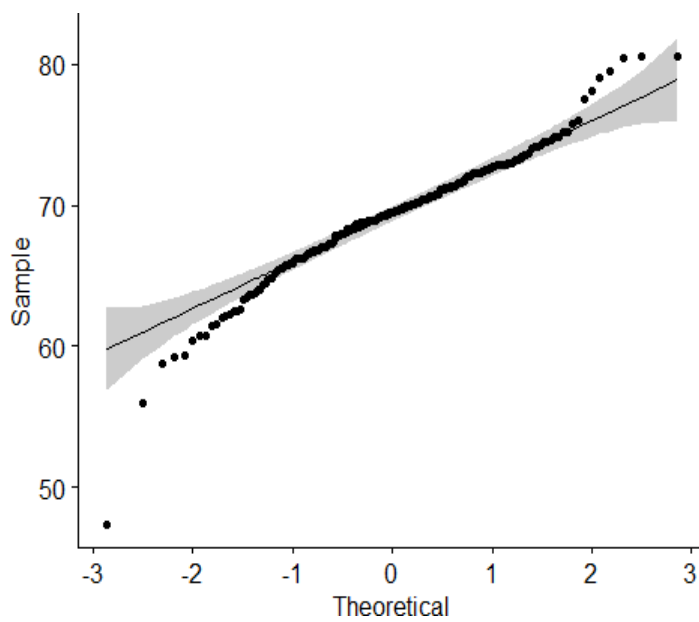
Estación BME 32

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9506	2.752e-07

Figura 27

Grafica SW BME32 HR



Los datos de Humedad del BME 32 no siguen una distribución normal.

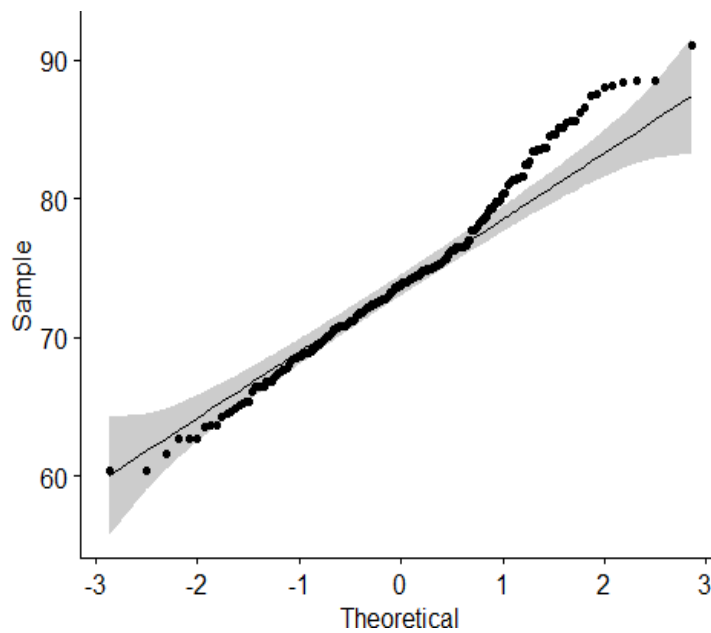
Estación BME 866

Shapiro-Wilk test de normalidad: st\$Valor

Test statistic	P valor
0.9826	0.004797

Figura 28

Grafica SW BME866 HR



Los datos de Humedad del BME 866 no siguen una distribución normal.

Dado que las 3 estaciones no cumplen el supuesto de normalidad aplicaremos 3 pruebas de bondad de ajuste.

- **Prueba Anova**

Modelo de Análisis de Varianza

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sensor	2	83872	41936	1097	6.425e-219
Residuals	717	27401	38.22	NA	NA

Dado que la probabilidad del estadístico $F[\text{pr}(>F)]$ es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Prueba de ajuste de Kolgomorov**

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME32

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = wq$ $y = bm32$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 240$ $n.y = 240$
Estadístico de Prueba:	$ks = 0.9625$
Parámetros del Estadístico:	$n = 240$ $m = 240$
Valor P:	0
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'wq' no es igual a la cdf de 'bm32'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME68

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = wq$ $y = bm866$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 240$ $n.y = 240$

Estadístico de Prueba:	$ks = 0.9916667$
Parámetros del Estadístico:	$n = 240$
	$m = 240$
Valor P:	0
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'wq' no es igual a la cdf de 'bm866'.

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que sí existen diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Distancia de Cramer Von Misses**

- **Waqi vs BME 32**

Test Stat: 158.01613

P-Valor: 0.00025

- **Waqi vs BME 866**

Test Stat: 161.06429

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Distancia de Wasserstein**

- **Waqi vs BME 32**

Test Stat: 20.05221

P-Valor: 0.000250

- **Waqi vs BME 866**

Test Stat: 24.94700

P-Valor: 0.000250

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

7.5.2. Sensores BME vs SENAMHI

A. Análisis Descriptivo

Tabla 8

Cuadro Resumen por Estación y Tipo de Dato Climatológico (BME's vs SENAMHI)

Dato	Sensor	Promedio	DesvStd	Cv	Registros
Humedad_Prom	BME 32	69.26	2.062	2.978	30
Humedad_Prom	BME 866	74.15	3.089	4.166	30
Humedad_Prom	SENAMHI	78.29	1.42	1.814	30
Humedad_Prom	Waqi	49.2	2.149	4.368	30
Temp_Max	BME 32	30.1	1.106	3.675	30
Temp_Max	BME 866	27.65	0.8723	3.155	30
Temp_Max	SENAMHI	24.9	1.398	5.616	30
Temp_Max	Waqi	36.93	1.662	4.501	30
Temp_Min	BME 32	27.96	0.8167	2.922	30
Temp_Min	BME 866	25.12	1.521	6.055	30
Temp_Min	SENAMHI	20.3	1.236	6.088	30
Temp_Min	Waqi	27.67	1.115	4.029	30

Interpretaciones:

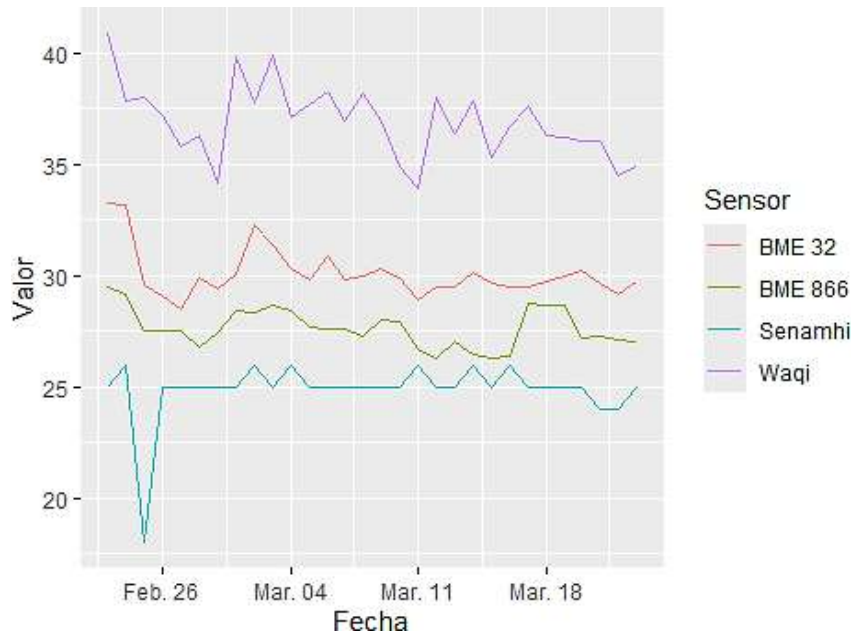
- Respecto a la humedad: se observa que los registros del sensor Waqi se encuentran más dispersos (2.149 puntos porcentuales con respecto a su promedio).
- Respecto a la Temperatura Máxima: las estaciones tienen una variación menor 1.7 grados respecto al valor promedio, cabe mencionar que los registros son homogéneos (cv<30%)

Gráficos Descriptivos:

a) Temperatura Máxima

Figura 29

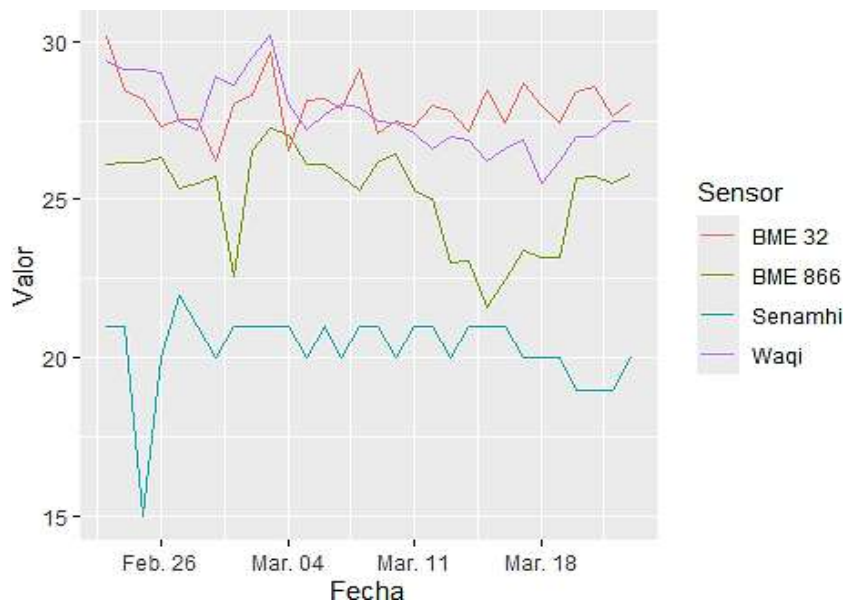
Temperatura Máxima por Día



b) Temperatura Mínima

Figura 30

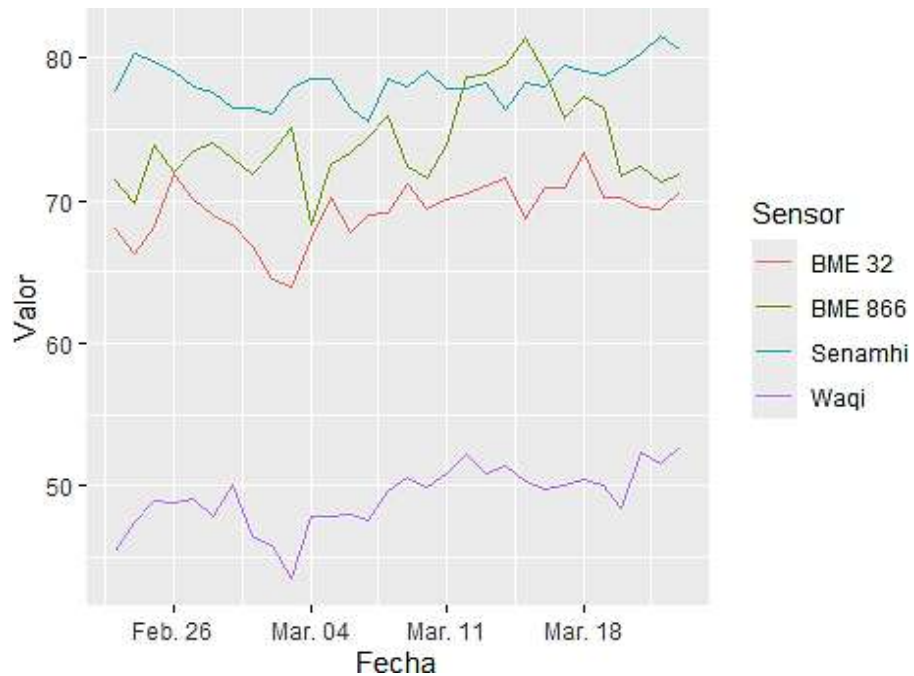
Temperatura Mínima por Día



c) **Humedad Relativa**

Figura 31

Humedad Relativa Promedio por Día



B. **Análisis Inferencial**

a) **Temperatura Máxima**

• **Prueba de Normalidad**

Se realizarán pruebas de normalidad para decidir qué tipo de prueba ejecutar, con el fin de evaluar el ajuste de los datos proporcionados por los sensores.

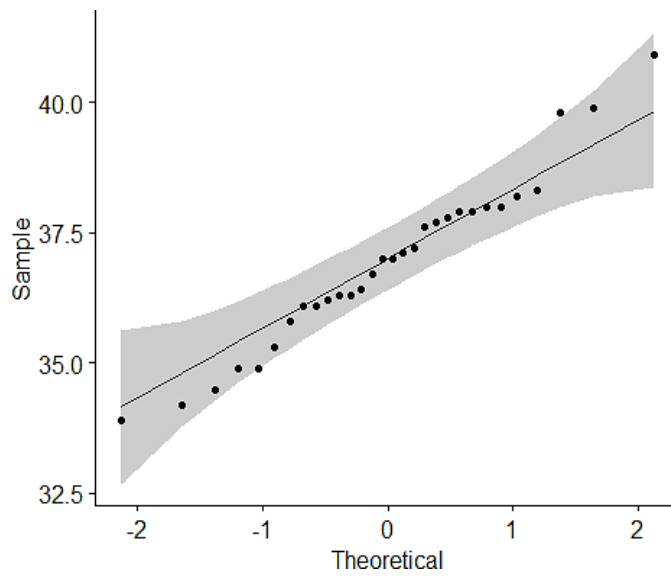
Estación Waqi

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.973	0.6231

Figura 32

Grafica SS Waqi TMax



Los datos de Temperatura máxima del sensor Waqi siguen una distribución normal.

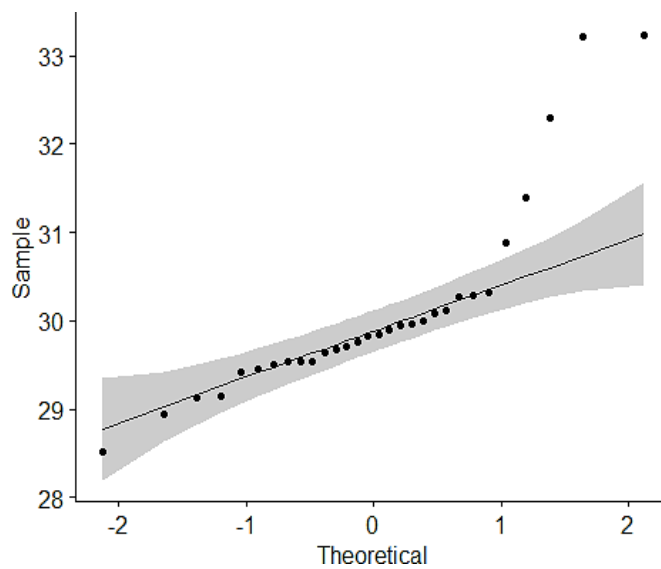
Estación BME 32

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.7948	5.272e-05

Figura 33

Grafica SS BME32 TMax



Los datos de Temperatura máxima del sensor BME 32 no siguen una distribución normal.

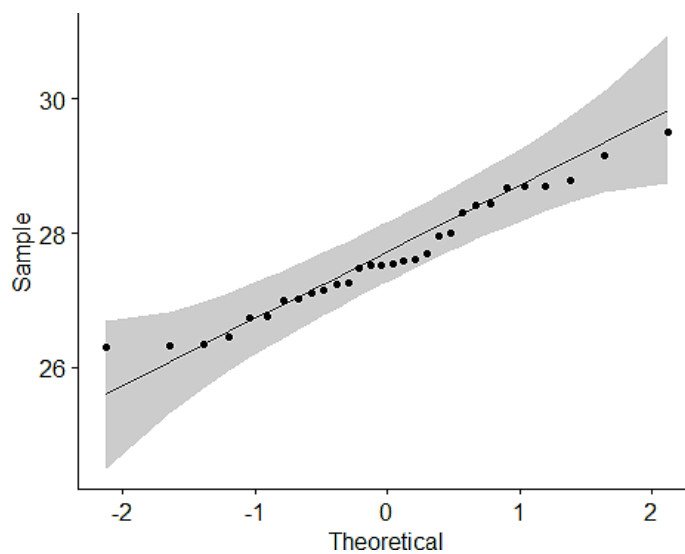
Estación BME 866

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.9632	0.3732

Figura 34

Grafica SS BME866 TMax



Los datos de Temperatura máxima del sensor BME 866 no siguen una distribución normal

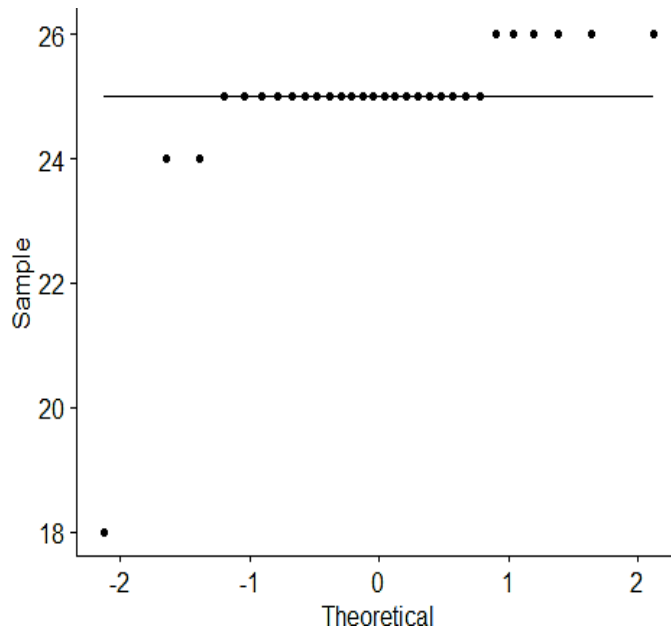
Estación SENAMHI

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.4417	1.367e-09

Figura 35

Grafica SS SENAMHI TMax



Los datos de Temperatura máxima del SENAMHI no siguen una distribución normal

Dado que tres de las estaciones cumplen con el supuesto de normalidad, aplicaremos una prueba ANOVA. Además, realizaremos las otras tres pruebas de bondad de ajuste.

- **Prueba Anova**

Analysis of Variance Model

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F valor	Pr(>F)
Sensor	3	2386	795.4	474.7	6.054e-65
Residuals	116	194.4	1.676	NA	NA

Dado que la probabilidad del estadístico F ($pr(>F)$) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los tres sensores.

- **Prueba de ajuste de Kolgomorov**

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME32

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	x = SENAMHI y = bm32
Tamaños de Muestra:	n.x = 30 n.y = 30
Estadístico de Prueba:	ks = 1
Parámetros del Estadístico:	n = 30 m = 30
Valor P:	1.691123e-17
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'SENAMHI' no es igual a la cdf de 'bm32'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME68

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	x = SENAMHI y = bm866
Tamaños de Muestra:	n.x = 30 n.y = 30
Estadístico de Prueba:	ks = 1
Parámetros del Estadístico:	n = 30 m = 30
Valor P:	1.691123e-17

Hipótesis Alternativa: La cdf de ' SENAMHI ' no es igual a la cdf de 'bm866'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste Waqi

Método de Prueba: 2-Muestra K-S GOF

Distribución Hipotética: Igual

Datos: x = SENAMHI

y = Waqi

Tamaños de Muestra: n.x = 30

n.y = 30

Estadístico de Prueba: ks = 1

Parámetros del Estadístico: n = 30

m = 30

Valor P: 1.691123e-17

Hipótesis Alternativa: La cdf de ' SENAMHI ' no es igual a la cdf de 'Waqi'.

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que sí existen diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Distancia de Cramer Von Misses**

SENAMHI vs BME 32

Test Stat: 28.91889

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs BME 866

Test Stat: 28.95889

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs Waqi

Test Stat: 28.76000

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Distancia de Wasserstein**

- **SENAMHI vs BME 32**

- Test Stat: 5.20100

- P-Valor: 0.00025

- **SENAMHI vs BME 866**

- Test Stat: 2.745333

- P-Valor: 0.00025

- **SENAMHI vs Waqi**

- Test Stat: 12.03000

- P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

b) Temperatura Mínima

- **Prueba de Normalidad**

- Se realizarán pruebas de normalidad para decidir qué tipo de prueba ejecutar, con el fin de evaluar el ajuste de los datos proporcionados por los sensores.

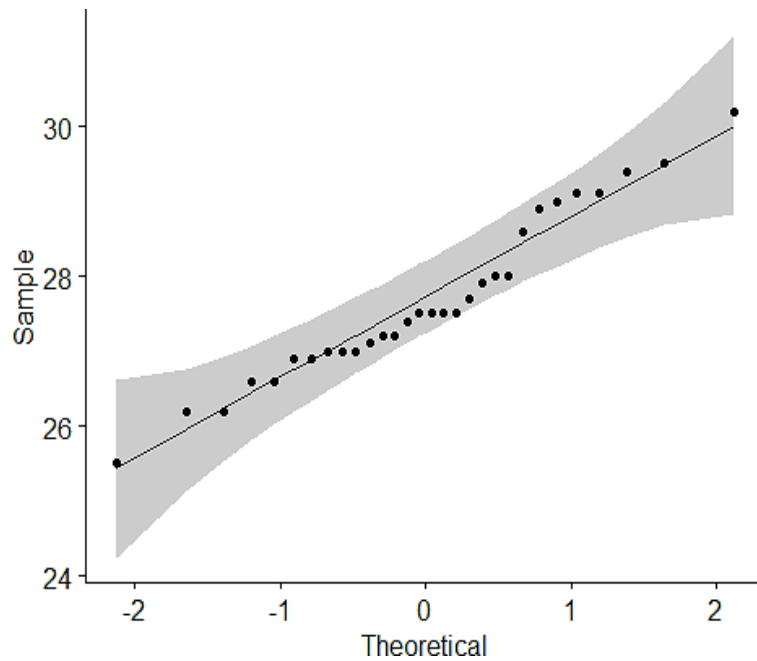
Estación Waqi

Shapiro-Wilk normality test: *st\$Valor*

Test statistic	P value
0.9589	0.2903

Figura 36

Grafica SS Waqi TMin



Los datos de Temperatura mínima del sensor Waqi siguen una distribución normal.

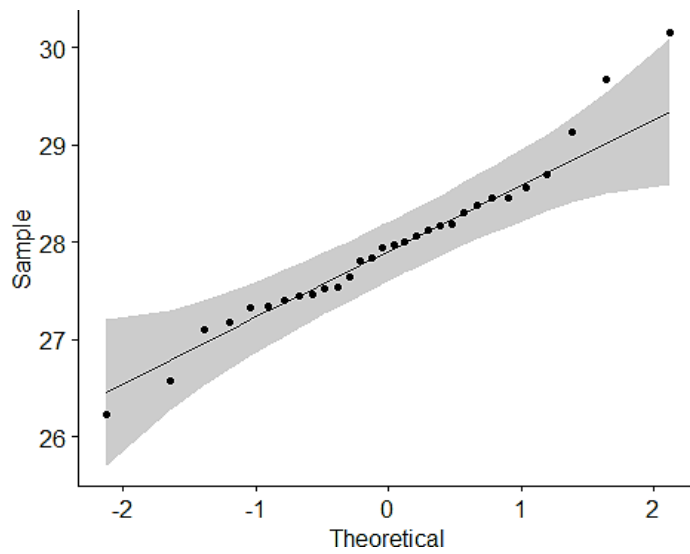
Estación BME 33

Shapiro-Wilk normality test: *st\$Valor*

Test statistic	P value
0.9635	0.3787

Figura 37

Grafica SS BME32 TMax



Los datos de Temperatura mínima del sensor BME 32 siguen una distribución normal.

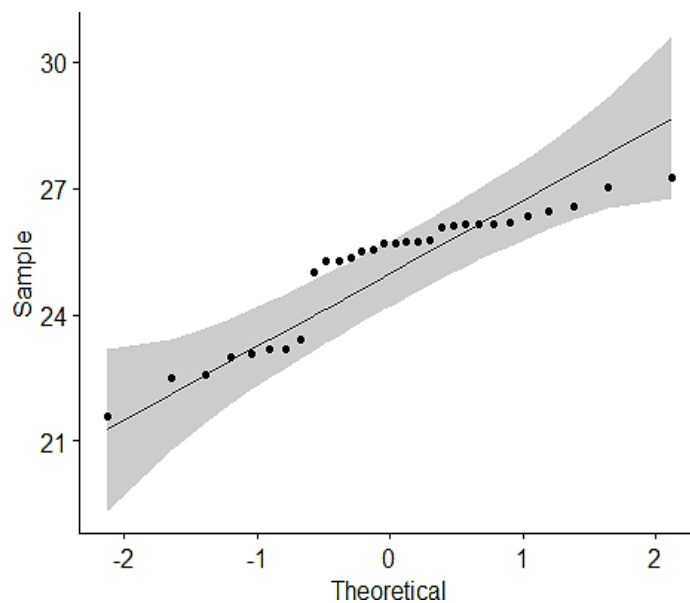
Estación BME 866

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.8664	0.001395

Figura 38

Grafica SS BME866 TMax



Los datos de Temperatura mínima del sensor BME 866 no siguen una distribución normal

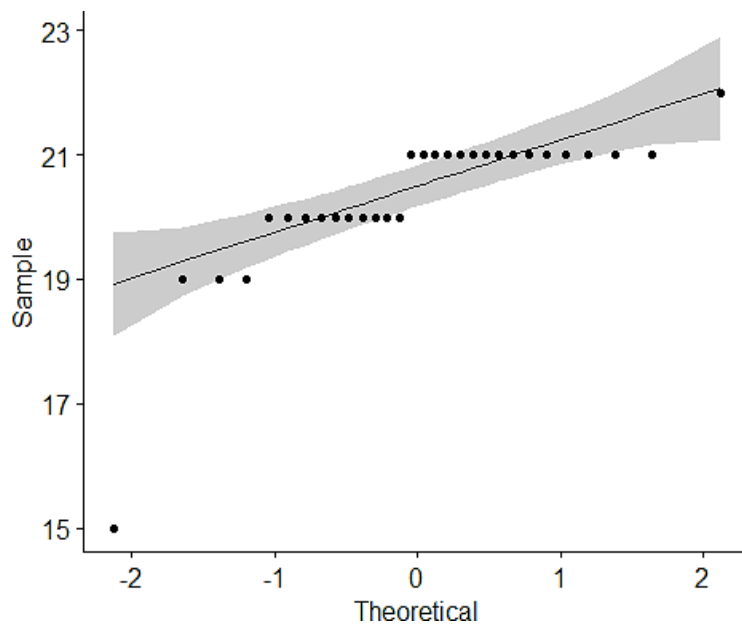
Estación SENAMHI

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.6699	5.86e-07

Figura 39

Grafica SS SENAMHI TMin



Los datos de Temperatura mínima del SENAMHI no siguen una distribución normal.

Dado que dos de las estaciones cumplen con el supuesto de normalidad, aplicaremos una prueba ANOVA. Además, realizaremos las otras tres pruebas de bondad de ajuste.

- **Prueba Anova**

Analysis of Variance Model

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sensor	3	1131	377.1	262.3	1.666e-51
Residuals	116	166.8	1.438	NA	NA

Dado que la probabilidad del estadístico F ($pr(>F)$) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Prueba de ajuste de Kolgomorov**

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME32

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	x = SENAMHI y = bm32
Tamaños de Muestra:	n.x = 30 n.y = 30
Estadístico de Prueba:	ks = 1
Parámetros del Estadístico:	n = 30 m = 30
Valor P:	1.691123e-17
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'SENAMHI' no es igual a la cdf de 'bm32'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME68

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	x = SENAMHI y = bm866
Tamaños de Muestra:	n.x = 30

	$n.y = 30$
Estadístico de Prueba:	$ks = 0.9666667$
Parámetros del Estadístico:	$n = 30$
	$m = 30$
Valor P:	$1.014674e-15$
Hipótesis Alternativa:	La cdf de ' SENAMHI ' no es igual a la cdf de 'bm866'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste Waqi

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = \text{SENAMHI}$
	$y = \text{Waqi}$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 30$
	$n.y = 30$
Estadístico de Prueba:	$ks = 1$
Parámetros del Estadístico:	$n = 30$
	$m = 30$
Valor P:	$1.691123e-17$
Hipótesis Alternativa:	La cdf de ' SENAMHI ' no es igual a la cdf de 'Waqi'.

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que sí existen diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Distancia de Cramer Von Misses**
SENAMHI vs BME 32

Test Stat: 26.75444

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs BME 866

Test Stat: 26.57333

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs Waqi

Test Stat: 26.20444

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Distancia de Wasserstein**

SENAMHI vs BME 32

Test Stat: 7.65600

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs BME 866

Test Stat: 4.823333

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs Waqi

Test Stat: 7.373333

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

c) Humedad Promedio

- **Prueba de Normalidad**

Se realizarán pruebas de normalidad para decidir qué tipo de prueba ejecutar, con el fin de evaluar el ajuste de los datos proporcionados por los sensores.

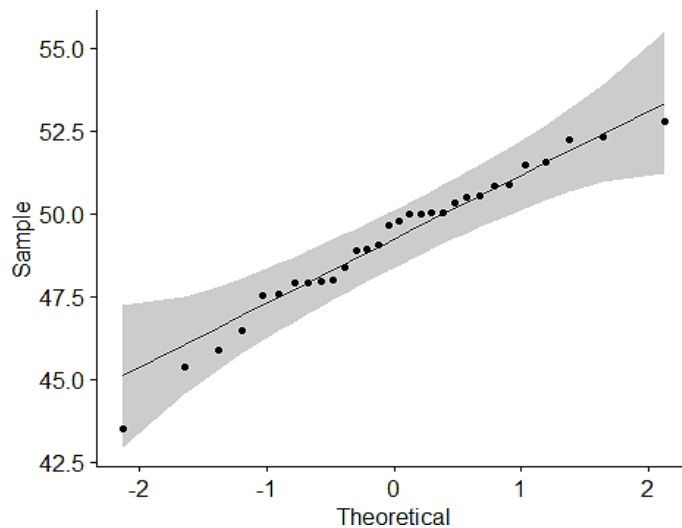
Estación Waqi

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.9666	0.4499

Figura 40

Grafica SS Waqi HM



Los datos de Humedad Relativa del sensor Waqi siguen una distribución normal.

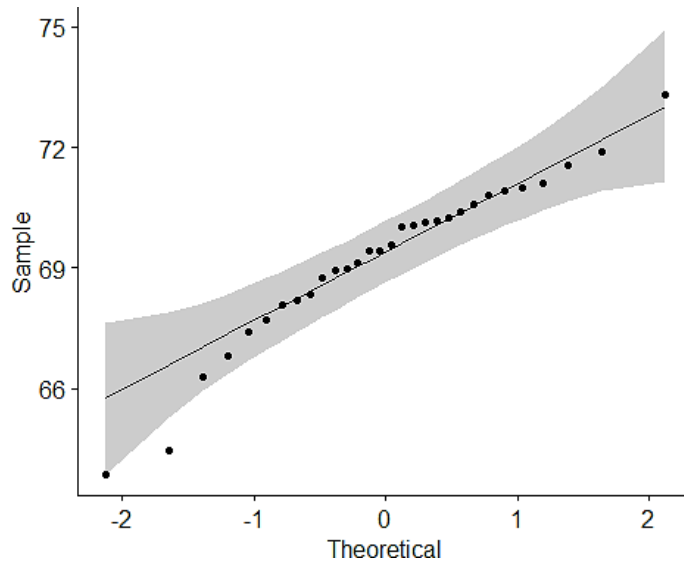
Estación BME 32

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.9509	0.1784

Figura 41

Grafica SS BME32 HM



Los datos de Humedad Relativa del sensor BME 32 siguen una distribución normal.

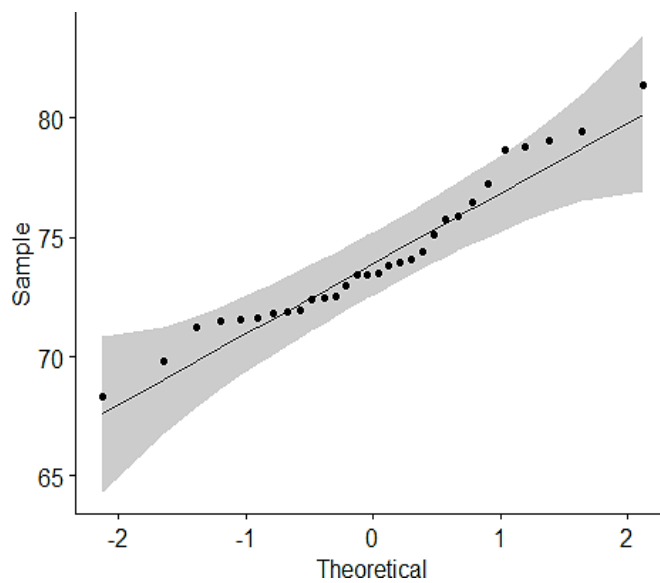
Estación BME 866

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.9498	0.1665

Figura 42

Grafica SS BME866 HM



Los datos de Humedad relativa del sensor BME 866 no siguen una distribución normal

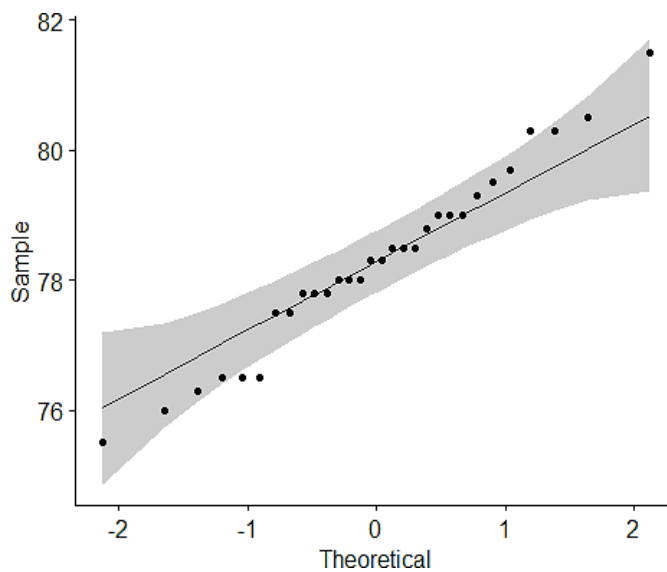
Estación SENAMHI

Shapiro-Wilk normality test: st\$Valor

Test statistic	P value
0.9808	0.8455

Figura 43

Grafica SS SENAMHI HM



Los datos de Humedad Relativa del SENAMHI siguen una distribución normal.

Dado que las cuatro estaciones cumplen con el supuesto de normalidad, aplicaremos una prueba ANOVA. Además, realizaremos las otras tres pruebas de bondad de ajuste.

- Prueba Anova**

Analysis of Variance Model

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sensor	3	14949	4983	975.7	4.322e-82
Residuals	116	592.4	5.107	NA	NA

Dado que la probabilidad del estadístico F ($pr(>F)$) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Prueba de ajuste de Kolgomorov**

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME32

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	x = SENAMHI y = bm32
Tamaños de Muestra:	n.x = 30 n.y = 30
Estadístico de Prueba:	ks = 1
Parámetros del Estadístico:	n = 30 m = 30
Valor P:	1.691123e-17
Hipótesis Alternativa:	La cdf de 'SENAMHI' no es igual a la cdf de 'bm32'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste BME68

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	x = SENAMHI y = bm866
Tamaños de Muestra:	n.x = 30

	$n.y = 30$
Estadístico de Prueba:	$ks = 0.7333333$
Parámetros del Estadístico:	$n = 30$
	$m = 30$
Valor P:	$2.587619e-08$
Hipótesis Alternativa:	La cdf de ' SENAMHI ' no es igual a la cdf de 'bm866'.

Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste Waqi

Método de Prueba:	2-Muestra K-S GOF
Distribución Hipotética:	Igual
Datos:	$x = \text{SENAMHI}$
	$y = \text{Waqi}$
Tamaños de Muestra:	$n.x = 30$
	$n.y = 30$
Estadístico de Prueba:	$ks = 1$
Parámetros del Estadístico:	$n = 30$
	$m = 30$
Valor P:	$1.691123e-17$
Hipótesis Alternativa:	La cdf de ' SENAMHI ' no es igual a la cdf de 'Waqi'.

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que sí existen diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Distancia de Cramer Von Misses**
SENAMHI vs BME 32

Test Stat: 19.38222

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs BME 866

Test Stat: 10.39333

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs Waqi

Test Stat: 19.38222

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existen diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

- **Distancia de Wasserstein**

SENAMHI vs BME 32

Test Stat: 9.034042

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs BME 866

Test Stat: 4.13925

P-Valor: 0.00025

SENAMHI vs Waqi

Test Stat: 29.08625

P-Valor: 0.00025

Dado que la probabilidad del estadístico F (P-valor) es menor a 0.05, concluimos que existe diferencias entre los valores arrojados por los cuatro sensores.

8. Conclusiones

Se determinaron los niveles de los parámetros de calidad del aire (ICA), compuestos orgánicos volátiles (COV), temperatura y humedad, de los cuatro sistemas de medición identificados en la ciudad de Trujillo: los prototipos BME32 y BME866 desarrollados por nosotros, y los sistemas ya existentes de Waqi y SENAMHI-La Libertad, correspondientes al periodo del 23/02/2024 al 24/03/2024.

El análisis de los datos obtenidos del aire en la urbanización Primavera muestra un promedio de temperatura de 27.64°C y una humedad relativa del 71.70%. En cuanto a la contaminación, la calidad del aire presenta un promedio de 41.02 ppm, situándose dentro de los umbrales establecidos por las directrices de la OMS como "BUENO".

El monitoreo de los datos obtenidos de los prototipos BME32 y BME866 se realizó utilizando la plataforma de UBIDOTS. Estos datos fueron visualizados en un dashboard, lo que facilitó su análisis y permitió la generación de un histórico de datos en Excel para su procesamiento.

Después de comparar los sensores BME32 y BME866 con los sensores de Waqi y SENAMHI utilizando distintos métodos, tanto paramétricos como no paramétricos, se obtuvieron resultados significativos. El sensor de Waqi mostró un desajuste en la precisión de la temperatura y la humedad debido a una calibración incorrecta, falta de mantenimiento y la exposición ambiental; como se puede visualizar en la figura 29, tomando como ejemplo el día 3 de marzo donde los sensores BME32, BME866, SENAMHI y Waqi marcaban 28°C, 26°C, 30°C y 40° C respectivamente. Este desbalance fue compensado con el sensor de SENAMHI, que presentó datos correctos tanto de temperatura como de humedad relativa. Sin embargo, los datos de calidad del aire proporcionados por el sensor de Waqi fueron adecuados para la comparación.

Los resultados de los diversos métodos aplicados proporcionan evidencia suficiente para afirmar que los sensores BME32 y BME866 ofrecen datos de compuestos orgánicos volátiles (PM), temperatura y humedad relativa muy similares a los proporcionados por los sensores de Waqi y SENAMHI, aunque no necesariamente de mayor exactitud, con diferencias de ± 0.15 PM, ± 1.16 RH y ± 0.24 °C

respectivamente para la calidad del aire. Esto demuestra la viabilidad del uso de estos sensores más económicos, lo que permitiría la implementación de más estaciones para obtener datos más precisos en el área de estudio.

En resumen, los sensores BME32 y BME866 representan una alternativa factible y económica para el monitoreo ambiental, complementando eficazmente los datos obtenidos de los sensores industriales. Esto sirve como una base sólida para futuros estudios de mayor complejidad y extensión.

9. Recomendaciones

- Para tener datos mucho más exactos sobre la calidad del aire es crucial contar con más estaciones, mínimo uno por manzana.
- Tener una conexión estable y continua de internet, ya que es primordial para la subida de datos a la nube.
- Es importante proteger el circuito utilizando un armazón diseñado específicamente para cubrirlo de la lluvia y el polvo, asegurándose de incluir agujeros en los costados para permitir un flujo de aire adecuado. Esto garantizará un sensado óptimo y fiable sin comprometer la protección del equipo.
- Se recomienda calibrar los sensores según las especificaciones detalladas en sus datasheets para garantizar la precisión y fiabilidad de los datos recogidos. Esto implica seguir procedimientos específicos que ayuden a evitar interferencias o fallos en las mediciones. Además de la calibración inicial, es aconsejable implementar un programa regular de calibración para mantener la exactitud a lo largo del tiempo.
- De ser necesario, para un uso más industrial, adquirir el paquete completo de la plataforma de UBIDOS, de esa forma poder usar todas las funciones que ofrece.

10. Referencias

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2023). *Cada vez que respiramos*. Agencia Europea de Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2013/articulos/cada-vez-que-respiramos>
- Air Central Texas. (2023). *Citizen Science/Air Quality Sensors*. <https://aircentraltexas.org/en/regional-air-quality/air-quality-awareness-week/citizen-science-air-quality-sensors>
- Amazon. (2023). *What is MQTT? - MQTT Protocol Explained*. Amazon.com. <https://aws.amazon.com/what-is/mqtt/>
- AQICN. (2020, marzo 28). *Uso de distancias estadísticas para la validación de redes de sensores en tiempo real*. Using Statistical Distances for Real-time Sensor Networks Validation. <https://aqicn.org/faq/using-statistical-distances-for-real-time-sensor-networks-validation/es/>
- Arduino. (2023). *Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1*. Arduino Documentation. <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics>
- Circuit Schools. (2022, marzo 3). *Interfacing BME680 with Arduino also measure Indoor Air Quality Index*. CircuitSchools Staff.
- Esfahani, S., Rollins, P., Specht, J. P., Cole, M., & Gardner, J. W. (2020). Smart City Battery Operated IoT Based Indoor Air Quality Monitoring System. *Proceedings of IEEE Sensors, 2020-October*. <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278913>
- Espressif Systems. (2017). The Internet of Things with ESP32. *ESP32-PICO-D4*. <http://esp32.net/>
- Faiazuddin, S., Lakshmaiah, M. V., Alam, K. T., & Ravikiran, M. (2020). IoT based Indoor Air Quality Monitoring system using Raspberry Pi4. *Proceedings of the 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2020*, 714-719. <https://doi.org/10.1109/ICECA49313.2020.9297442>

Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., ... Yan, C. (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535-e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)

Generalitat Valenciana. (2023). *La contaminación atmosférica*. Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica. <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-contaminacion-atmosferica>

Jose, J., & Sasipraba, T. (2019). Indoor air quality monitors using IOT sensors and LPWAN. *Proceedings of the International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2019, 2019-April*, 633-637. <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2019.8862647>

Kok, C. H., Azlan, M. A. M., & Ong, S. E. (2020). IoT based Low Cost Distributed Air Quality Monitoring System for Big Data Collection. *Proceedings - 10th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2020, 7-10*. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE50387.2020.9204954>

Mackenzie, J., & Turrentine, J. (2021, junio 22). *Air Pollution: Everything You Need to Know*. NRDC. <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know#whatis>

Marinov, M. B., Iliev, D. I., Djamiykov, T. S., Rachev, I. V., & Asparuhova, K. K. (2019). Portable air purifier with air quality monitoring sensor. *2019 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ET.2019.8878570>

Microsoft Azure. (2023). *What is the Cloud*. Azure. <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-the-cloud>

Minam, Oefa, & SENAMHI. (2021). *MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE*. Minam. <https://infoaireperu.minam.gob.pe/monitoreo-atmosferico/>

MQTT. (2022). *What is MQTT?* MQTT.org. <https://mqtt.org/faq/>

- National Geographic. (2023). *Air*. National Geographic. <https://education.nationalgeographic.org/resource/air/>
- OMS, & OPS. (2022, abril 4). *Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS*. Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/es/noticias/4-4-2022-miles-millones-personas-siguen-respirando-aire-insalubre-nuevos-datos-oms>
- Ortiz, D. (2023). *¿Qué es un dashboard y para qué se usa?* Cyberclick. <https://www.cyberclick.es/numerical-blog/que-es-un-dashboard>
- PurpleAir. (2023). *Air Quality Monitoring*. PurpleAir. <https://www2.purpleair.com/>
- Rohan Kumar, J. (2020). Air Quality Sensing and Reporting System Using IoT. *Proceedings of the 2nd International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2020*, 790-793. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA48905.2020.9182796>
- S. Gillis, A. (2023). *What is IoT (Internet of Things) and How Does it Work?* TechTarget. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>
- SENAMHI. (2023). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*. Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/senamhi>
- Ubidots. (2023, abril 11). *Powerful but simple Industrial IoT*. Ubidots. <https://ubidots.com/>
- US EPA. (2022a, julio 18). *Particulate Matter (PM) Basics*. US EPA. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- US EPA. (2022b, septiembre 27). *Air*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/report-environment/air>
- US EPA. (2023a, marzo 15). *NAAQS Table*. US EPA. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- US EPA. (2023b, marzo 15). *What are volatile organic compounds (VOCs)?* United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>

WHO Regional Office for Europe. (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project Technical Report*.
<http://www.euro.who.int/pubrequest>

11. Anexos

Anexo A. Datos obtenidos en Excel

Tabla A1

Datos de Temperatura y Humedad promedio

Sensor	Fecha	T. Max	T. Min	Hum. Prom
BME 32	23/02/2024	33.23	30.15	68.07
BME 32	24/02/2024	33.21	28.45	66.28875
BME 32	25/02/2024	29.54	28.19	68.20875
BME 32	26/02/2024	29.12	27.33	71.8875
BME 32	27/02/2024	28.52	27.53	70.05
BME 32	28/02/2024	29.94	27.54	68.9475
BME 32	29/02/2024	29.41	26.23	68.36125
BME 32	01/03/2024	30.09	28	66.8025
BME 32	02/03/2024	32.29	28.3	64.47125
BME 32	03/03/2024	31.39	29.68	63.8875
BME 32	04/03/2024	30.32	26.57	67.40375
BME 32	05/03/2024	29.83	28.12	70.1425
BME 32	06/03/2024	30.88	28.17	67.70625
BME 32	07/03/2024	29.84	27.84	68.9825
BME 32	08/03/2024	30	29.13	69.14375
BME 32	09/03/2024	30.29	27.1	71.1225
BME 32	10/03/2024	29.9	27.46	69.41
BME 32	11/03/2024	28.94	27.34	70.01625
BME 32	12/03/2024	29.53	27.97	70.41625
BME 32	13/03/2024	29.46	27.81	70.9825
BME 32	14/03/2024	30.12	27.17	71.55875
BME 32	15/03/2024	29.64	28.46	68.7675
BME 32	16/03/2024	29.53	27.4	70.91
BME 32	17/03/2024	29.51	28.7	70.82375
BME 32	18/03/2024	29.7	27.95	73.29125
BME 32	19/03/2024	29.96	27.44	70.19
BME 32	20/03/2024	30.27	28.38	70.23
BME 32	21/03/2024	29.67	28.56	69.5875
BME 32	22/03/2024	29.14	27.65	69.4325
BME 32	23/03/2024	29.76	28.06	70.58625
BME 866	23/02/2024	29.51	26.14	71.4635417

BME 866	24/02/2024	29.15	26.15	69.8241667
BME 866	25/02/2024	27.54	26.19	73.8335417
BME 866	26/02/2024	27.52	26.35	71.91375
BME 866	27/02/2024	27.53	25.37	73.4925
BME 866	28/02/2024	26.77	25.54	74.0775
BME 866	29/02/2024	27.48	25.75	72.9625
BME 866	01/03/2024	28.42	22.56	71.8925
BME 866	02/03/2024	28.31	26.57	73.40125
BME 866	03/03/2024	28.68	27.24	75.14375
BME 866	04/03/2024	28.43	27.04	68.33
BME 866	05/03/2024	27.7	26.12	72.53625
BME 866	06/03/2024	27.62	26.09	73.4
BME 866	07/03/2024	27.59	25.71	74.43
BME 866	08/03/2024	27.26	25.29	75.92
BME 866	09/03/2024	28.01	26.17	72.41875
BME 866	10/03/2024	27.95	26.46	71.54875
BME 866	11/03/2024	26.74	25.28	73.945
BME 866	12/03/2024	26.33	25.01	78.645
BME 866	13/03/2024	27.01	23.01	78.79375
BME 866	14/03/2024	26.46	23.06	79.46125
BME 866	15/03/2024	26.31	21.6	81.3875
BME 866	16/03/2024	26.34	22.49	79.05375
BME 866	17/03/2024	28.78	23.4	75.7625
BME 866	18/03/2024	28.69	23.2	77.2625
BME 866	19/03/2024	28.69	23.2	76.46375
BME 866	20/03/2024	27.16	25.7	71.64125
BME 866	21/03/2024	27.24	25.72	72.445
BME 866	22/03/2024	27.11	25.52	71.2325
BME 866	23/03/2024	27.03	25.77	71.84
Waqi	23/02/2024	40.9	29.4	45.3875
Waqi	24/02/2024	37.9	29.1	47.525
Waqi	25/02/2024	38	29.1	48.9125
Waqi	26/02/2024	37.2	29	48.8625

Waqi	27/02/2024	35.8	27.5	49.0375
Waqi	28/02/2024	36.3	27.2	47.8875
Waqi	29/02/2024	34.2	28.9	49.9875
Waqi	01/03/2024	39.8	28.6	46.4625
Waqi	02/03/2024	37.8	29.5	45.8875
Waqi	03/03/2024	39.9	30.2	43.5125
Waqi	04/03/2024	37.1	28	47.9125
Waqi	05/03/2024	37.7	27.2	47.9375
Waqi	06/03/2024	38.3	27.7	47.975
Waqi	07/03/2024	37	28	47.5625
Waqi	08/03/2024	38.2	27.9	49.6625
Waqi	09/03/2024	37	27.5	50.5375
Waqi	10/03/2024	34.9	27.4	49.975
Waqi	11/03/2024	33.9	27.1	50.8375
Waqi	12/03/2024	38	26.6	52.2375
Waqi	13/03/2024	36.4	27	50.8625
Waqi	14/03/2024	37.9	26.9	51.475
Waqi	15/03/2024	35.3	26.2	50.3375
Waqi	16/03/2024	36.7	26.6	49.7875
Waqi	17/03/2024	37.6	26.9	50.0125
Waqi	18/03/2024	36.3	25.5	50.5
Waqi	19/03/2024	36.2	26.2	50.025
Waqi	20/03/2024	36.1	27	48.375
Waqi	21/03/2024	36.1	27	52.3
Waqi	22/03/2024	34.5	27.5	51.5625
Waqi	23/03/2024	34.9	27.5	52.775
Senamhi	23/02/2024	25	21	77.5
Senamhi	24/02/2024	26	21	80.3
Senamhi	25/02/2024	18	15	79.7
Senamhi	26/02/2024	25	20	79
Senamhi	27/02/2024	25	22	78
Senamhi	28/02/2024	25	21	77.5
Senamhi	29/02/2024	25	20	76.5
Senamhi	01/03/2024	25	21	76.5
Senamhi	02/03/2024	26	21	76
Senamhi	03/03/2024	25	21	77.8
Senamhi	04/03/2024	26	21	78.5
Senamhi	05/03/2024	25	20	78.5
Senamhi	06/03/2024	25	21	76.5
Senamhi	07/03/2024	25	20	75.5
Senamhi	08/03/2024	25	21	78.5
Senamhi	09/03/2024	25	21	78
Senamhi	10/03/2024	25	20	79

Senamhi	11/03/2024	26	21	77.8
Senamhi	12/03/2024	25	21	77.8
Senamhi	13/03/2024	25	20	78.3
Senamhi	14/03/2024	26	21	76.3
Senamhi	15/03/2024	25	21	78.3
Senamhi	16/03/2024	26	21	78
Senamhi	17/03/2024	25	20	79.5
Senamhi	18/03/2024	25	20	79
Senamhi	19/03/2024	25	20	78.8
Senamhi	20/03/2024	25	19	79.3
Senamhi	21/03/2024	24	19	80.3
Senamhi	22/03/2024	24	19	81.5
Senamhi	23/03/2024	25	20	80.5

Tabla A2*Datos de Temperatura, Humedad promedio y COV*

Sensor	Dato	Hora	23-Feb	24-Feb	25-Feb	26-Feb	27-Feb	28-Feb	29-Feb	1-Mar	2-Mar	3-Mar	4-Mar
Waqi	Temperatura	12:00:00 a. m.	29.7	30.4	30.2	30.8	29.3	29.1	30	30.2	30.3	30.9	29.4
Waqi	Temperatura	03:00:00 a. m.	30.3	29.7	29.1	30.2	28.1	28.1	29.6	28.6	30.2	30.2	28.7
Waqi	Temperatura	06:00:00 a. m.	29.4	29.1	29.1	29.7	27.5	27.2	29.7	29.1	29.5	30.2	28
Waqi	Temperatura	09:00:00 a. m.	30	29.3	29.1	30.1	28	28.8	30.5	28.8	29.7	30.5	28
Waqi	Temperatura	12:00:00 p. m.	36.9	36.2	33.2	33.5	33.7	33.9	33	34.7	35.3	37.7	33.8
Waqi	Temperatura	03:00:00 p. m.	40.9	37.9	38	37.2	35.8	36.3	34.2	39.8	37.1	39.9	37.1
Waqi	Temperatura	06:00:00 p. m.	39.9	34.2	34.2	33.4	33.6	35.4	31.8	36.5	37.8	38	36.4
Waqi	Temperatura	09:00:00 p. m.	31.6	30.8	30.8	29	29.7	30.1	28.9	31.4	32.2	39.9	29.1
Waqi	Humedad	12:00:00 a. m.	52.1	49.5	49	50.5	51.5	52.4	52.1	50.6	52	49.5	48.5
Waqi	Humedad	03:00:00 a. m.	53.5	53	58	55	54	56.5	54.5	54.8	51.5	52.7	53.4
Waqi	Humedad	06:00:00 a. m.	56.2	54.5	56	56.6	57	57	56.5	53.5	53	53.1	56.5
Waqi	Humedad	09:00:00 a. m.	53.6	53	53.8	54	55	55.5	55.5	51.8	54.2	51	56.8
Waqi	Humedad	12:00:00 p. m.	37.7	39.5	44.9	42.9	42.5	42.7	44.7	41.1	40.8	36.2	43.5
Waqi	Humedad	03:00:00 p. m.	30.8	35.6	34.5	35.9	39	37.6	40.1	36.6	36.6	30.5	36.1
Waqi	Humedad	06:00:00 p. m.	31.2	42.6	42.6	43.5	41.8	37.4	44	36.8	33.5	30.9	36.5
Waqi	Humedad	09:00:00 p. m.	48	52.5	52.5	52.5	51.5	44	52.5	46.5	45.5	44.2	52

Waqi	PM	12:00:00 a. m.	33.8	28.3	32.5	42	41.9	37.7	48.6	88.3	57.9	44.5	48.8
Waqi	PM	03:00:00 a. m.	18.4	23.8	23.6	33.8	63.2	29.3	50.7	50.5	50.5	51.4	31.5
Waqi	PM	06:00:00 a. m.	26.5	44.1	28.9	45.5	38.8	26.2	43.7	51.6	56.2	51.9	37.3
Waqi	PM	09:00:00 a. m.	33.7	64.7	32.4	58.7	39.7	36.4	76.8	69.6	59.7	63.2	48.8
Waqi	PM	12:00:00 p. m.	54.3	30.3	18.4	52.8	29.3	39.6	60.9	58.2	73.7	50.8	48.4
Waqi	PM	03:00:00 p. m.	10.7	25.7	19.4	14.4	20.7	23.2	55.7	42.3	58.4	32.9	23.1
Waqi	PM	06:00:00 p. m.	26.7	31.9	32.6	20.7	19.8	23.9	47.1	34.3	39.5	14.4	24.2
Waqi	PM	09:00:00 p. m.	26.2	45.4	38.8	47.9	35.8	42.6	61.3	52.7	41.4	37	37.4
BME 32	Temperatur a	12:00:00 a. m.	30.19	33.21	28.19	28.48	28.07	28.67	28.51	28	29.76	30.11	28.9
BME 32	Temperatur a	03:00:00 a. m.	30.15	30.31	28.45	27.35	27.55	28.77	28.67	28.36	29.55	30.78	29.14
BME 32	Temperatur a	06:00:00 a. m.	30.46	30.66	28.87	28.21	28.21	27.54	28.5	28.69	28.3	29.68	26.57
BME 32	Temperatur a	09:00:00 a. m.	30.51	32.19	28.5	28.35	28.42	28.9	28.11	29.52	28.45	30.62	29.58

BME 32	Temperatura	12:00:00 p. m.	33.23	32.78	29.54	29.12	27.64	29	29.41	29.92	29.91	30.92	30.17
BME 32	Temperatura	03:00:00 p. m.	32.21	30.58	28.28	28.35	28.52	29.65	26.23	30.07	32.29	31.39	30.32
BME 32	Temperatura	06:00:00 p. m.	31.45	29.16	29.47	27.33	27.53	29.94	29.11	30.09	30.88	30.18	30.12
BME 32	Temperatura	09:00:00 p. m.	30.42	28.45	29.32	29	28.13	29.27	28.77	29.9	30.26	30.37	29.87
BME 32	Humedad	12:00:00 a. m.	72.92	55.95	72.37	70.41	68.8	68.8	69.92	71.59	64.78	62.09	64.81
BME 32	Humedad	03:00:00 a. m.	69.68	70.23	68.63	72.27	69.92	69.82	69.12	69.55	65.79	68.9	71.08
BME 32	Humedad	06:00:00 a. m.	69.74	66.65	70.33	73.14	74.52	74.52	70.24	69.12	72.84	68.88	67.45
BME 32	Humedad	09:00:00 a. m.	74.13	62.6	80.61	80.54	72.77	72.77	71.35	67	65.26	62.48	67.97
BME 32	Humedad	12:00:00 p. m.	68.8	60.72	61.47	66.47	68.3	69.3	66.86	65.55	66.19	62.12	67.1
BME 32	Humedad	03:00:00 p. m.	67.24	70.07	58.73	68.73	66.73	63.96	66.25	63.47	59.24	60.8	65.93

BME 32	Humedad	06:00:0 0 p. m.	61.6	72.42	63.62	71.63	68.5	65.63	66.91	63.67	59.4	62.54	66.25
BME 32	Humedad	09:00:0 0 p. m.	60.45	71.67	69.91	71.91	70.86	66.78	66.24	64.47	62.27	63.29	68.64
BME 32	PM	12:00:0 0 a. m.	34.8816	29.2056	33.54	43.344	40.64	36.56	47.14	85.65	59.75	45.92	50.36
BME 32	PM	03:00:0 0 a. m.	18.9888	24.5616	24.355	34.881	61.30	28.42	49.17	48.98	52.11	53.04	32.50
BME 32	PM	06:00:0 0 a. m.	27.348	45.5112	29.824	46.956	37.63	25.41	42.38	50.05	57.99	53.56	38.49
BME 32	PM	09:00:0 0 a. m.	34.7784	66.7704	33.436	60.578	38.50	35.30	74.49	67.51	61.61	65.22	50.36
BME 32	PM	12:00:0 0 p. m.	56.0376	31.2696	18.988	54.489	28.42	38.41	59.07	56.45	76.05	52.42	49.94
BME 32	PM	03:00:0 0 p. m.	11.0424	26.5224	20.020	14.860	20.07	22.50	54.02	41.03	60.26	33.95	23.83
BME 32	PM	06:00:0 0 p. m.	27.5544	32.9208	33.643	21.362	19.20	23.18	45.68	33.27	40.76	14.86	24.97
BME 32	PM	09:00:0 0 p. m.	27.0384	46.8528	40.041	49.432	34.72	41.32	59.46	51.11	42.72	38.18	38.59

BME 866	Temperatur a	12:00:0 0 a. m.	26.19	26.19	26.19	27.49	27.07	26.67	26.19	22.56	28.09	28.23	28.09
BME 866	Temperatur a	03:00:0 0 a. m.	26.15	26.15	26.45	26.38	26.55	26.77	26.13	26.86	27.35	28.31	27.13
BME 866	Temperatur a	06:00:0 0 a. m.	26.45	26.45	26.89	27.21	25.37	25.54	26.24	26.42	27.29	28.41	27.29
BME 866	Temperatur a	09:00:0 0 a. m.	26.51	26.51	26.51	27.41	26.09	26.09	25.75	27.02	27.45	28.47	27.62
BME 866	Temperatur a	12:00:0 0 p. m.	29.51	28.59	27.54	27.12	25.64	25.64	26.21	27.24	28.31	28.68	28.31
BME 866	Temperatur a	03:00:0 0 p. m.	28.18	29.15	26.28	26.35	26.51	26.29	27.48	27.97	27.81	27.78	28.43
BME 866	Temperatur a	06:00:0 0 p. m.	27.45	26.45	27.47	27.52	27.53	26.53	26.59	27.92	26.57	27.24	27.34
BME 866	Temperatur a	09:00:0 0 p. m.	26.14	26.19	27.32	27	27.13	26.55	27.19	28.42	27.41	27.71	27.04
BME 866	Humedad	12:00:0 0 a. m.	79.7383 333	81.5533 333	83.368 3333	70.59	70.8	70.8	73.1	66.15	66.81	69.21	66.81
BME 866	Humedad	03:00:0 0 a. m.	74.33	73.98	73.63	74.27	71.82	71.82	72.92	70.86	70.14	66.47	71.01

BME 866	Humedad	06:00:0 0 a. m.	74.93	75.13	75.33	75.14	76.52	76.52	72.24	72.18	68.89	76.48	68.89
BME 866	Humedad	09:00:0 0 a. m.	81.29	73.45	85.61	84.58	74.77	74.77	74.36	68.78	67.26	82.4	67.1
BME 866	Humedad	12:00:0 0 p. m.	68.27	66.47	66.47	66.47	76.3	76.3	73.29	84.46	86.56	67.72	64.22
BME 866	Humedad	03:00:0 0 p. m.	64.49	62.73	62.73	62.73	76.82	80.95	76.27	81.4	76.48	79.05	65.32
BME 866	Humedad	06:00:0 0 p. m.	65.1	63.61	68.62	70.62	70.05	70.24	72.2	67.67	70.73	78.7	71.65
BME 866	Humedad	09:00:0 0 p. m.	63.56	61.67	74.91	70.91	70.86	71.22	69.32	63.64	80.34	81.12	71.64
BME 866	PM	12:00:0 0 a. m.	32.45	27.19	33.71	40.32	40.2	36.21	46.64	91.66	55.64	42.7	50.59
BME 866	PM	03:00:0 0 a. m.	17.66	24.71	24.54	35.14	65.54	30.42	52.66	52.36	52.35	53.31	32.7
BME 866	PM	06:00:0 0 a. m.	27.58	45.69	27.72	47.24	40.28	27.2	42	53.48	58.24	53.86	38.69
BME 866	PM	09:00:0 0 a. m.	32.4	62.17	31.13	56.3	38.08	34.98	79.67	66.89	61.93	65.61	46.88

BME 866	PM	12:00:0 0 p. m.	52.21	29.1	19.12	50.7	30.37	41.14	63.14	55.87	70.73	52.65	50.2
BME 866	PM	03:00:0 0 p. m.	11.1	26.68	20.14	13.83	21.54	24.07	57.83	43.92	60.58	34.13	22.16
BME 866	PM	06:00:0 0 p. m.	25.63	33.11	33.78	21.5	19.03	24.8	45.23	35.55	37.94	13.84	25.13
BME 866	PM	09:00:0 0 p. m.	27.16	43.66	40.24	45.94	37.12	40.94	63.6	54.68	39.79	38.4	38.77

Anexo B. Códigos

Anexo B1 Código del BME68X/BME32

```
#include "bsec.h"
#include "Ubidots.h"
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

const char *UBIDOTS_TOKEN = "BBUS-5Ggqt16ee2dCcT0fzSErPRsmar2cy4";
const char *WIFI_SSID = "MENDEZ"; // Wi-Fi SSID
const char *WIFI_PASS = "mendez96"; // Wi-Fi password
const char *DEVICE_LABEL = "ESP32"; // Device label

Ubidots ubidots(UBIDOTS_TOKEN, UBI_HTTP);
void checkIaqSensorStatus(void);
void errLeds(void);
const unsigned long ENVIO = 60000UL;
unsigned long envio;

Bsec iaqSensor;
String output;
void setup(void)
{
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
  iaqSensor.begin(0x77, Wire);
  checkIaqSensorStatus();

  bsec_virtual_sensor_t sensorList[10] = {
    BSEC_OUTPUT_RAW_TEMPERATURE,
    BSEC_OUTPUT_RAW_PRESSURE,
    BSEC_OUTPUT_RAW_HUMIDITY,
    BSEC_OUTPUT_IAQ,
    BSEC_OUTPUT_CO2_EQUIVALENT,
  };
  iaqSensor.updateSubscription(sensorList, 10, BSEC_SAMPLE_RATE_LP);
  checkIaqSensorStatus();
}
void loop(void)
{
  unsigned long time_trigger = millis();
  if( time_trigger > envio ){
  if (iaqSensor.run()) { // If new data is available
    output = String(time_trigger);
    output += ", " + String(iaqSensor.pressure);
    output += ", " + String(iaqSensor.iaq);
    output += ", " + String(iaqSensor.temperature);
    output += ", " + String(iaqSensor.humidity);
    output += ", " + String(iaqSensor.co2Equivalent);

    Serial.print("Temperature: ");
    Serial.print(iaqSensor.temperature);
    Serial.println(" *C");
    Serial.print("Humidity: ");
    Serial.print(iaqSensor.humidity);
    Serial.println(" %");
    Serial.print("IAQ: ");
    Serial.print(iaqSensor.iaq);
```

```

    Serial.println(" PPM");

    float t = iaqSensor.temperature;
    float h = iaqSensor.humidity;
    float i = iaqSensor.iaq;

    ubidots.add("temperature", t);
    ubidots.add("humidity", h);
    ubidots.add("iaq", i);

    bool bufferSent = false;
    bufferSent = ubidots.send(); //

    if (bufferSent) {
        // Do something if values were sent properly
        Serial.println("Values sent by the device");
    }
    delay(5000);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
}
envio += ENVIO;
}
else {
    checkIaqSensorStatus();
}
}

// Helper function definitions
void checkIaqSensorStatus(void)
{
    if (iaqSensor.bsecStatus != BSEC_OK) {
        if (iaqSensor.bsecStatus < BSEC_OK) {
            output = "BSEC error code : " + String(iaqSensor.bsecStatus);
            Serial.println(output);
            for (;;)
                errLeds(); /* Halt in case of failure */
        } else {
            output = "BSEC warning code : " + String(iaqSensor.bsecStatus);
            Serial.println(output);
        }
    }
    if (iaqSensor.bme68xStatus != BME68X_OK) {
        if (iaqSensor.bme68xStatus < BME68X_OK) {
            output = "BME680 error code : " + String(iaqSensor.bme68xStatus);
            Serial.println(output);
            for (;;)
                errLeds(); /* Halt in case of failure */
        } else {
            output = "BME680 warning code : " + String(iaqSensor.bme68xStatus);
            Serial.println(output);
        }
    }
}
}

void errLeds(void)
{
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    delay(100);
}
}

```

Anexo B2 Código de App Script

```
var TOKEN = "BBUS-5Ggqt16ee2dCcT0fzSErPRsmar2cy4"
var URL = "http://industrial.api.ubidots.com/api/v1.6/"
var DEVICE_ID = "663becfd0c0bd5000e5d2010"
var VARIABLE_ID1 = "663becfd0c0bd5000e5d2011"
var VARIABLE_ID2 = "663bed0c89f2f7000c55e2f9"
var VARIABLE_ID3 = "663bed1c5cbc4800ca6d7c5"

var NUMBER_OF_VALUES = "200" // Number of values to retrieve from the variable.
var VARIABLE_SHEET = "Variables"
var VALUES_SHEET = "Values"
function onOpen() {
var sheet = SpreadsheetApp.getActive();
var menuItems = [
{name: 'Get Ubidots Variables', functionName: 'get_ds_variables'},
{name: 'Get Data', functionName: 'get_variable_data'}
];
sheet.addMenu('Ubidots', menuItems);
}

function get_ds_variables(){
var sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().getSheetByName(VARIABLE_SHEET);
if (sheet != null) {
SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().deleteSheet(sheet);
}
sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().insertSheet();
sheet.setName(VARIABLE_SHEET);
var options =
{
"contentType" : "application/json",
"headers" : {"X-Auth-Token": TOKEN},
"method": "get"
};
var response = UrlFetchApp.fetch(URL + "datasources/" + DEVICE_ID + "/variables/",
options);
var obj = JSON.parse(response).results
for (var i = 0, l = obj.length; i < l; i++) {
var date = new Date(obj[i].last_activity)
sheet.appendRow([obj[i].name, date, obj[i].last_value.value, obj[i].unit]);
}
}

function get_variable_data(){
var sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().getSheetByName(VALUES_SHEET);
if (sheet != null) {
SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().deleteSheet(sheet);
}
sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().insertSheet();
sheet.setName(VALUES_SHEET);
var options =
```



```

{
  "contentType" : "application/json",
  "headers" : {"X-Auth-Token": TOKEN},
  "method": "get"
};
var response = UrlFetchApp.fetch( URL + "variables/"+ VARIABLE_ID1
+ "/values/?page_size="+ NUMBER_OF_VALUES, options);
var obj = JSON.parse(response).results
var response = UrlFetchApp.fetch( URL + "variables/"+ VARIABLE_ID2
+ "/values/?page_size="+ NUMBER_OF_VALUES, options);
var obj1 = JSON.parse(response).results
var response = UrlFetchApp.fetch( URL + "variables/"+ VARIABLE_ID3
+ "/values/?page_size="+ NUMBER_OF_VALUES, options);
var obj2 = JSON.parse(response).results
for (var i = 0, l = obj.length; i < l; i++) {
var date = new Date(obj[i].timestamp)
sheet.appendRow([date, obj[i].value, obj1[i].value, obj2[i].value]);
}
}

```

Anexo C. Fotografías

Anexo C1 Prototipo sensor BME68X

a.



b.



(a. Sensor BME32, b. Interior del sensor BME32)

Anexo C *Locación del Sensor*

a.



b.



(a. Calle Villalobos 644 B. Parque Marquina)