



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

*“Estudio en la duda. Acción en la fe”*



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS  
METEOROLÓGICOS BÁSICOS DEL AIRE AMBIENTE EXTERIOR  
MEDIDOS CON SENSORES DE BAJO COSTO**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

RICARDO RAMOS PÉREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

M.I.P.A. SERGIO RAMOS HERRERA

Villahermosa, Tabasco, México.

Agosto de 2024.

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 31 del mes de julio del año 2024, el que suscribe **RICARDO RAMOS PÉREZ** alumna(o) del Programa de **INGENIERÍA AMBIENTAL** con número de matrícula **192G24020** adscrito a la **DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(a) (es) de la Tesis presentada para la obtención de (título, diploma o grado según sea el caso) **LICENCIATURA** y titulada **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS BÁSICOS DEL AIRE AMBIENTE EXTERIOR MEDIDOS CON SENSORES DE BAJO COSTO”** dirigida por M.I.P.A. **SERGIO RAMOS HERRERA**.

### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 22 de agosto 2024.



---

Ricardo Ramos Pérez



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



**2024**  
**Felipe Carrillo**  
**PUERTO**  
MINISTERIO DEL POSTGRADO,  
DESARROLLO Y DEFENSA  
DEL MAR  
GOBIERNO DE  
MÉXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 31 de Julio de 2024


**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. RICARDO RAMOS PÉREZ** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS BÁSICOS DEL AIRE AMBIENTE EXTERIOR MEDIDOS CON SENSORES DE BAJO COSTO”**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

**A T E N T A M E N T E**

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



**2024**  
**Felipe Carrillo**  
**PUERTO**  
MEMORANDO DEL PROLETARIADO:  
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR  
DEL NOTAB  
GOBIERNO DE  
MÉXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

**JULIO 31 DE 2024**

**C. RICARDO RAMOS PÉREZ  
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS BÁSICOS DEL AIRE AMBIENTE EXTERIOR MEDIDOS CON SENSORES DE BAJO COSTO”**, asesorado por el M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la Dra. Liliana Pampillón González, Dr. Raúl German Bautista Margulis, M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera, Dra. Carolina Zequeira Larios y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez.

**A T E N T A M E N T E  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

**U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN.**

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
Archivo.

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA  
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx



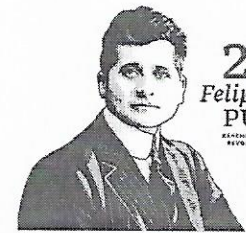
Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**2024**  
**Felipe Carrillo**  
**PUERTO**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN  
REVOLUCIONARIA Y DEFENSA  
DEL INTERIOR  
GOBIERNO DE  
MÉXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

31 de julio de 2024

**C. Ricardo Ramos Pérez**  
**Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental.**  
**PRESENTE**

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su documento de tesis "**Estudio del comportamiento de parámetros meteorológicos básicos del aire ambiente exterior medidos con sensores de bajo costo**".

**OBSERVACIONES:**

Se incluyeron citas, se excluyó bibliografía y fuentes pequeñas, y se limitó el tamaño de coincidencias a 10 palabras.

<b>RESULTADO DE SIMILITUD</b>	<b>8 %</b>
	<b>13824 palabras, 69 coincidencias y 39 fuentes</b>

Finalmente, se le solicita al **C. Ricardo Ramos Pérez**, integrar en la versión final del trabajo recepcional (Tesis), este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**



C.c.p. MIPA. Sergio Ramos Herrera. Director de tesis  
C.c.p. Archivo

# Estudio del comportamiento de parámetros meteorológicos básicos del aire ambiente exterior medidos con sensores de bajo costo

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

ÍNDICE DE SIMILITUD

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://forum.arduino.cc">forum.arduino.cc</a> Internet	113 palabras — 1%
2	<a href="http://repositorioinstitucional.uson.mx">repositorioinstitucional.uson.mx</a> Internet	108 palabras — 1%
3	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Internet	82 palabras — 1%
4	<a href="http://www.vistronica.com">www.vistronica.com</a> Internet	78 palabras — 1%
5	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet	74 palabras — 1%
6	<a href="http://microcontrollerslab.com">microcontrollerslab.com</a> Internet	46 palabras — < 1%
7	<a href="http://pdfcoffee.com">pdfcoffee.com</a> Internet	36 palabras — < 1%
8	<a href="http://www.ucentral.cl">www.ucentral.cl</a> Internet	34 palabras — < 1%
9	<a href="http://123dok.com">123dok.com</a> Internet	33 palabras — < 1%

10	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Internet	32 palabras — < 1%
11	<a href="https://nanopdf.com">nanopdf.com</a> Internet	29 palabras — < 1%
12	<a href="http://www.ecosur.mx">www.ecosur.mx</a> Internet	29 palabras — < 1%
13	<a href="https://ehub247.com.ng">ehub247.com.ng</a> Internet	25 palabras — < 1%
14	<a href="https://heraldodemexico.com.mx">heraldodemexico.com.mx</a> Internet	20 palabras — < 1%
15	<a href="https://repositorio.ug.edu.ec">repositorio.ug.edu.ec</a> Internet	19 palabras — < 1%
16	<a href="https://revistasipgh.org">revistasipgh.org</a> Internet	19 palabras — < 1%
17	<a href="https://idus.us.es">idus.us.es</a> Internet	18 palabras — < 1%
18	<a href="http://www.proyecto1867.com">www.proyecto1867.com</a> Internet	17 palabras — < 1%
19	<a href="https://blinkynina-w102.blogspot.com">blinkynina-w102.blogspot.com</a> Internet	16 palabras — < 1%
20	<a href="http://www.ujat.mx">www.ujat.mx</a> Internet	16 palabras — < 1%
21	<a href="https://gaceta.diputados.gob.mx">gaceta.diputados.gob.mx</a> Internet	15 palabras — < 1%

22	<a href="http://www.geniolandia.com">www.geniolandia.com</a> Internet	15 palabras — < 1%
23	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec">repositorio.ucsg.edu.ec</a> Internet	14 palabras — < 1%
24	<a href="http://www.wndgroup.io">www.wndgroup.io</a> Internet	14 palabras — < 1%
25	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Internet	13 palabras — < 1%
26	<a href="http://proteccioncivil.durango.gob.mx">proteccioncivil.durango.gob.mx</a> Internet	13 palabras — < 1%
27	<a href="http://aplicandolatermodinamica.blogspot.com">aplicandolatermodinamica.blogspot.com</a> Internet	12 palabras — < 1%
28	<a href="http://worldwidescience.org">worldwidescience.org</a> Internet	12 palabras — < 1%
29	<a href="http://www.puce.edu.ec">www.puce.edu.ec</a> Internet	12 palabras — < 1%
30	<a href="http://www.wfsmexico.org">www.wfsmexico.org</a> Internet	12 palabras — < 1%
31	<a href="http://doczz.es">doczz.es</a> Internet	11 palabras — < 1%
32	<a href="http://gresis.osc.int">gresis.osc.int</a> Internet	11 palabras — < 1%
33	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Internet	11 palabras — < 1%

[eprints.uanl.mx](http://eprints.uanl.mx)

34	Internet	10 palabras — < 1%
35	helvia.uco.es Internet	10 palabras — < 1%
36	repository.uamerica.edu.co Internet	10 palabras — < 1%
37	www.bago.com Internet	10 palabras — < 1%
38	www.lacoyuntura.cl Internet	10 palabras — < 1%
39	www.scielo.org.mx Internet	10 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

DESACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 10 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS BÁSICOS DEL AIRE AMBIENTE EXTERIOR MEDIDOS CON SENSORES DE BAJO COSTO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 31 de Julio de Dos Mil Veinticuatro.

AUTORIZO



---

RICARDO RAMOS PÉREZ

# Contenido

Índice de figuras.....	I
Índice de tablas.....	II
Resumen .....	1
Abstract.....	2
1. Introducción .....	3
2. Justificación .....	5
3. Objetivo General .....	7
3.1 Objetivos Específicos .....	7
4. Antecedentes .....	8
5. Marco Teórico .....	12
5.1. Arduino.....	12
5.2. Sensores.....	12
5.3. BME680 .....	13
5.4. Shield Datalogger.....	15
5.5 HC-05.....	15
5.6. Parámetros Meteorológicos Básicos .....	16
5.6.1. Temperatura.....	16
5.6.2. Humedad Relativa .....	16
5.6.3. Presión Atmosférica .....	17
5.7. Índice De Calor .....	17
5.8. Olas De Calor.....	17
5.9. DHT22.....	18
5.10. LM35.....	18
5.11. BME280 .....	18
6. Materiales Y Metodología.....	20

7. Desarrollo Del Dispositivo Electrónico De Monitoreo Permanente De Temperatura, Humedad Y Presión Atmosférica Del Aire .....	22
7.1. Librerías Del Programa .....	23
7.2. Definición De Variables Y Configuración .....	24
7.3. Función Setup().....	25
7.4. Función Loop().....	26
8. Modelo Del Sensor BME680 Con El Dispositivo HC-05 .....	28
8.1. Librerías Del Dispositivo Bluetooth.....	30
8.2. Variables Y Configuración.....	30
8.3. Void Setup .....	31
8.4. Void Loop.....	32
8.5. Desarrollo De La Base De Datos.....	35
8.6. Estudio Del Comportamiento Temporal De Los Parámetros Meteorológicos.....	36
9. Resultados Y Discusión .....	40
9.1. Estadísticas Generales .....	43
9.2. Tendencia Horaria De Los Parámetros.....	45
9.3. Tendencia Mensual De Los Parámetros.....	49
9.4. Olas De Calor.....	52
9.4.1. Segunda Ola De Calor .....	52
9.4.2. Tercera Ola De Calor .....	53
9.5. Series De Tiempo.....	55
10. Conclusiones .....	58
Perspectivas .....	60
11. Referencias.....	61

**Índice de figuras**

Figura 1 Tarjeta Arduino UNO.....	12
Figura 2 Sensor BME680.....	14
Figura 3 Shield Datalogger V1.0.....	15
Figura 4 Modulo HC – 05.....	16
Figura 5 Diagrama esquemático del BME680 con Shield Datalogger. ....	22
Figura 6 Librerías para el sensor BME680.....	24
Figura 7 Variables y configuraciones utilizadas para el sensor BME680.....	24
Figura 8 Configuración de los componentes del sensor BME680.....	26
Figura 9 Bucle del código BME680.....	28
Figura 10 Diagrama esquemático de BME680 con HC-05. ....	29
Figura 11 Librerías utilizadas para el módulo HC – 05.....	30
Figura 12 Variables y configuraciones utilizadas para el módulo HC – 05.....	31
Figura 13 Configuración de los componentes del módulo HC – 05.....	31
Figura 14 Bucle del módulo HC – 05.....	33
Figura 15 Datos obtenidos del sensor a través de la aplicación Serial Bluetooth Terminal .....	34
Figura 16 Funcionamiento del módulo bluetooth en el Arduino IDE.....	34
Figura 17 Base de datos de los parámetros ambientales en Excel .....	36
Figura 18 Figura presentada por el NWS (Opitz-Stapleton et al., 2016).....	38
Figura 19 Efectos adversos debido al aumento del estrés térmico.....	39
Figura 20 Dispositivo para la medición permanente en funcionamiento.....	40
Figura 21 Dispositivo para la medición permanente en vista desde otro ángulo.....	41
Figura 22 Dispositivo de conexión bluetooth en funcionamiento. ....	41
Figura 23 Dispositivo de conexión bluetooth en vista desde otro ángulo.....	42
Figura 24 Tendencia horaria de la temperatura en 2023.....	45
Figura 25 Tendencia horaria de la humedad relativa en 2023.....	46
Figura 26 Tendencia horaria de la presión barométrica en 2023.....	47
Figura 27 Tendencia horaria del índice de calor en 2023.....	48
Figura 28 Tendencia mensual de la temperatura en 2023 .....	50
Figura 29 Tendencia mensual de la humedad en 2023.....	51
Figura 30 Tendencia horaria durante la segunda ola de calor de 2023.....	53
Figura 31 Tendencia horaria durante la tercera ola de calor de 2023.....	54

Figura 32 Serie de tiempo de la temperatura por día .....	56
Figura 33 Serie de tiempo de la humedad por día.....	57
Figura 34 Serie de tiempo de la presión por día.....	57
Figura 35 Serie de tiempo del índice de calor .....	58

### Índice de tablas

Tabla 1 Materiales para el desarrollo del prototipo medidor de parámetros meteorológicos.....	20
Tabla 2 Intervalos de operación del sensor BME680 .....	21
Tabla 3 Pines para la conexión del MBE680 con el Arduino uno. ....	23
Tabla 4 Conexiones del BME680 con HC – 05 .....	29
Tabla 5 Resumen estadístico de los datos por estación.....	44
Tabla 6 Modelos de tendencia lineal .....	55

## **Estudio Del Comportamiento De Parámetros Meteorológicos Básicos Del Aire Ambiente Exterior Medidos Con SBC.**

### **Resumen**

Los Sensores De Bajo Costo (SBC) son dispositivos que se utilizan para medir y monitorear diversas variables ambientales, físicas, químicas o biológicas a un bajo costo en comparación con los sensores tradicionales. Estos sensores son populares debido a su accesibilidad y capacidad para ser implementados en una variedad de aplicaciones, especialmente en proyectos de bajo presupuesto o en áreas donde se requiere una gran cantidad de sensores. El avance tecnológico ha permitido que estos sensores sean fáciles de adquirir y de mantener en comparación a las estaciones meteorológicas actuales, sin embargo, aún se enfrentan a desafíos en la estandarización y validación de datos.

Este estudio explora el uso de hardware libre, específicamente la placa microcontroladora Arduino UNO, en combinación con el sensor BME680 de Bosch, que mide temperatura, humedad y presión atmosférica. Además, se utilizó el Shield Data Logger para el almacenamiento de datos y un módulo HC-05 para la comunicación Bluetooth. El software Arduino IDE y Jamovi se emplearon para la programación y análisis de datos.

El estudio se llevó a cabo en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, donde se desarrolló un dispositivo prototipo que operó durante 12 meses, tomando lecturas cada tres minutos. Los resultados mostraron que este dispositivo se posiciona como una alternativa viable para instituciones con presupuestos limitados. Su versatilidad lo hace ideal para proyectos IoT (Internet of Things), estaciones meteorológicas, dispositivos de monitoreo ambiental y proyectos involucrados en el análisis de la calidad de aire.

**Palabras clave:** *Arduino, BME680, Estación, HC-05, SBC.*

### Abstract

Low-cost Sensors (LCS) are devices used to measure and monitor various environmental, physical, chemical, or biological variables at a low cost compared to traditional sensors. These sensors are popular due to their accessibility and ability to be deployed in a variety of applications, especially in low-budget projects or areas requiring many sensors. Technological advancements have made these sensors easy to acquire and maintain compared to current weather stations; however, they still face challenges in data standardization and validation.

This study explores the use of open-source hardware, specifically the Arduino UNO microcontroller board, in conjunction with the Bosch BME680 sensor, which measures temperature, humidity, and atmospheric pressure. Additionally, a Data Logger Shield was used for data storage, and an HC-05 module for Bluetooth communication. The Arduino IDE and Jamovi software were employed for programming and data analysis.

The study was conducted at the Academic Division of Biological Sciences (DACBIOL) of the Autonomous University of Tabasco, where a prototype device operated for 12 months, taking readings every three minutes. The results indicated that this device stands as a viable alternative for institutions with limited budgets. Its versatility makes it ideal for IoT (Internet of Things) projects, weather stations, environmental monitoring devices, and projects involved in air quality analysis.

**Keywords:** *Arduino, BME680, Station, HC-05, SBC.*

## 1. Introducción

La medición de parámetros ambientales es una actividad fundamental para la gestión y comprensión del comportamiento del medio ambiente. Los métodos y dispositivos de medición han evolucionado gracias a la tecnología y cada vez cuentan con mayor precisión. El avance tecnológico ha logrado que estos dispositivos que antes se encontraban a precios excesivamente altos, hoy cuenten con un precio razonable. Este avance ha ocasionado que equipos baratos sustituyan los equipos actuales en diferentes ámbitos. Por tal motivo, a partir del 2013, los SBC se convirtieron en una alternativa económicamente viable para sustituir equipos de monitoreo de calidad de aire, lo que ha permitido el desarrollo de numerosos proyectos. La definición de los SBC varía dependiendo del autor y el intervalo de precios de estos sensores (que varía entre \$100 y \$500 dólares). Además de su precio, los bajos costos de operación y mantenimiento, facilita su adquisición y la rapidez con la que se pueden reemplazar. A pesar de estas ventajas, debe tenerse en cuenta que es una tecnología que se encuentra en desarrollo y que es capaz de presentar desventajas como la falta de estandarización de principios de operación y de validación de la información (García & Rico, 2019).

Otro componente interesante para el desarrollo de equipo de monitoreo económicamente viables es el empleo del hardware libre Arduino uno. Este dispositivo es una placa microcontroladora que tiene un conjunto de pines a los que se conecta electrónicamente en diversos SBC o cualquier otro módulo compatible con la placa como escudos o shields y módulos para la comunicación inalámbrica. En este trabajo se explicará cómo se programaron y conectaron electrónicamente el SBC BME680 que mide la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica del aire, un escudo shield data logger y un módulo HC-05 para la comunicación bluetooth. El BME680 fue desarrollado por la empresa líder en tecnología y servicios Bosch y especialmente para aplicaciones móviles, donde el tamaño y el bajo consumo de energía son requisitos críticos (Bosch Sensortec, 2024). La tarjeta Shield data logger es un componente económico e importante diseñado para el almacenamiento de los datos: esta tarjeta es compatible con el Arduino UNO y funciona en tarjetas microSD FAT16 o FAT32 e incluye un reloj en tiempo real que mantiene la hora incluso cuando la tarjeta no recibe alimentación (Adafruit Industries, 2024). Por último, el módulo HC-05 es un dispositivo que permite la conexión inalámbrica a través de bluetooth con un intervalo de frecuencia de 2.4 •

GHz. Todos estos componentes, permiten el desarrollo de una estación meteorológica de bajo costo.

En el desarrollo de este trabajo se utilizó software libre Arduino IDE y Jamovi. Arduino IDE es una plataforma electrónica de código abierto basado en el lenguaje C++ de programación usado para diversos proyectos, desde objetos cotidianos hasta instrumentos científicos complejos. Es una herramienta para la creación rápida de prototipos, dirigida para personas sin experiencias en la electrónica y en programación. Además, es flexible y es usado para crear instrumentos científicos de bajo costo (Arduino, 2018). Jamovi es un software de estadística bastante fácil de implementar en el análisis de la información y visualización de la misma.

Este trabajo se enfocó en el estudio del comportamiento temporal de parámetros meteorológicos básicos como la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica del aire ambiente exterior en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Para lograr este objetivo, se desarrolló un dispositivo prototipo con el sensor BME680, la tarjeta Arduino uno, un escudo o shield data logger para el registro de datos y un módulo HC-05 para la comunicación vía bluetooth. El dispositivo se mantuvo en operación cerca de un año, tomando lecturas cada tres minutos de los parámetros antes mencionados. A continuación, se describen la justificación que llevó al desarrollo de este trabajo, los objetivos que se siguieron, los antecedentes, el marco teórico que contienen conceptos esenciales para entender este trabajo, la metodología extendida de cómo se lograron los objetivos específicos planteados y por supuesto, cuáles fueron los resultados más relevantes.

## 2. Justificación

El monitoreo de parámetros meteorológicos es una parte importante en un programa de vigilancia y mejoramiento de la calidad de aire ambiente local. El monitoreo estándar se realiza con equipos de referencia, sin embargo, su alto costo tanto de adquisición como de operación, mantenimiento correctivo, reparación y sustitución lo hace inviable económicamente para proyectos de bajo recurso económico. Por esta razón, la comunidad científica está alentando el monitoreo emergente mediante tecnología de bajo costo. Una de estas tecnologías es la programación de SBC con hardware libre, como Arduino uno.

En la actualidad, el avance tecnológico ha facilitado el acceso a este tipo de dispositivos haciéndolos asequibles para el público en general. La fiabilidad de estos sensores los posiciona como una opción viable para que las personas monitoreen el entorno en diferentes lugares y compitiendo con estaciones meteorológicas de alto nivel. Además, pueden ser modificados y complementados con diversos componentes, ampliando así su gama de aplicaciones.

En 2013 la asociación de gestión de aire y residuos (AWMA) por sus siglas en inglés, menciona que los sensores de este tipo se han estado implementando en varias aplicaciones. Sin embargo, la mayoría de los sensores no han sido evaluados y la calidad de los datos no está bien caracterizada. Además, la falta de instalaciones, de instrumentos de calibración y la experiencia en el monitoreo de la contaminación del aire son desafíos que se deben de abordar si se plantea el desarrollo en una estación meteorológica y de contaminantes (Williams, 2014).

Este trabajo aporta una metodología para el monitoreo de parámetros meteorológicos básicos que es factible económica y tecnológicamente porque se basa en la programación de SBC con el hardware libre Arduino uno, una placa electrónica controladora de componentes periféricos. El dispositivo desarrollado con esta tecnología es la primera estación meteorológica de su tipo en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol), y la información generada de manera permanente cada tres minutos de temperatura, humedad relativa del aire y presión atmosférica está disponible de forma remota y gratuita a la comunidad universitaria de la DACBiol que es la principal beneficiaria de este trabajo y al público interesado en consultarla.

Además, el desarrollo de dispositivos con comunicación por bluetooth permitirá a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental, concretamente en las asignaturas de Climatología y Monitoreo Atmosférico, realizar prácticas de toma y análisis de datos en tiempo real. Finalmente, este trabajo sienta las bases para futuros proyectos en el monitoreo de contaminantes de aire.

México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

### 3. Objetivo General

Analizar el comportamiento temporal de tres parámetros meteorológicos básicos: temperatura, humedad relativa y la presión atmosférica; medidos en el aire ambiente exterior de la DACBIOL con datos generados por sensores de bajo costo.

#### 3.1 Objetivos Específicos

- Desarrollar un prototipo electrónico equipado con un sensor de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica del aire ambiente exterior
- Generar una base de datos de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en el aire ambiente exterior de la DACBIOL
- Estudiar el comportamiento temporal de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica del aire ambiente exterior en DACBIOL

#### 4. Antecedentes

El estudio de parámetros meteorológicos ha sido importante en el ambiente ya que nos permite evaluar las condiciones en la que se encuentra nuestro ecosistema. A lo largo de los años se ha presenciado un incremento de la temperatura en la atmósfera debido al calentamiento global ocasionado por Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos por las actividades antropogénicas. Esto ha provocado una preocupación en la sociedad por el ambiente; debido a que el aumento de la temperatura genera efectos perjudiciales en la salud, afecta la actividad económica y en general el bienestar de la población. Al realizar monitoreos del aire ambiente no solo conocemos la condición actual de un sitio, sino que además, podemos analizar los posibles riesgos en la población debido a cambios drásticos en parámetros como la temperatura y concentración de contaminantes y determinar qué acciones deberíamos implementar ahora y en el futuro para reducir dichos riesgos. Otro beneficio es que la información generada en una localidad puede compararse con la información generada por otras estaciones cercanas a la región y percibir si nuestra situación es peor o mejor que en otros sitios. Bajo este contexto, se han desarrollado varios trabajos de monitoreo del aire con SBC de los cuales se presentarán algunos a continuación.

Por ejemplo, Suárez et al. (2017) desarrollaron un sistema para la adquisición de datos meteorológicos georreferenciados con aseguramiento de la información para su análisis posterior. El sistema móvil o aéreo que utilizaron fue el dron DJI Phantom 3 standard al que se le integraron los sensores DHT22, BNP180 y un receptor GPS para determinar temperatura, humedad del aire, presión barométrica, altitud y posición geográfica del punto de adquisición de datos. Normalmente este tipo de mediciones se realiza por radiosondas que son lanzadas en globos meteorológicos y también es común que lo realicen instituciones de gobierno o instituciones que se dedican al estudio del clima y que cuentan con el recurso económico suficiente para realizar esta tarea de investigación. Pero en este caso se realizó el sistema de radio sondeo con SBC y la tarjeta Raspberry pi que es preferida por algunos sobre Arduino uno, aunque es más costosa. Las mediciones se realizaron hasta una altitud de 120 m, que fue la altura máxima recomendada por el fabricante del dron, pero fue suficiente para obtener el gradiente ambiental de la temperatura de la atmósfera local.

Por otra parte, la falta de planificación urbana ha permitido que fuentes industriales de contaminación se construyan cerca de zonas residenciales densamente pobladas. Esto ha provocado efectos dañinos para la salud pública y el medio ambiente, ocasionando que las ciudades en constante crecimiento tengan una desventaja marcada en cuanto a la calidad de aire se refiere. La normatividad vigente en México no se encuentra en la posibilidad de competir con estas tecnologías y la velocidad en la que se maneja la información. Actualmente los SBC se presentan como una opción para crear nuevos proyectos en el tema de la calidad del aire y se han generado propuestas para generar redes de monitoreo basado en SBC para el monitoreo de temperatura, humedad relativa, presión,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$  y  $SO_2$  de acuerdo a los límites máximos permisibles de la normatividad vigente. Aunque esta tecnología está considerada solo como emergente, bien puede generar información donde no hay sitios o estaciones de monitoreo que permitan evaluar la calidad del aire ambiente (Rico, 2018).

Uno de los SBC que se ha utilizado frecuentemente para medir la temperatura y humedad relativa del aire ha sido el DHT22. Precisamente, en la facultad de ingeniería de la universidad de Indonesia se desarrolló un sistema de adquisición de datos basado en Arduino y el DHT22 para medir y controlar la humedad en una incubadora portátil para bebés. Como la humedad es un parámetro importante en las incubadoras, el interés fue que las lecturas de humedad del DHT22 fuesen lo más parecidas a las lecturas de un termómetro de referencia. Por tal razón fue necesaria la calibración del sensor. La metodología que se utilizó fue bastante sencilla y consistió en obtener la recta de regresión lineal entre los valores registrados con el sensor,  $RH_{DHT}$ , y los valores  $RH_{ASTM}$  registrados manualmente por un termómetro de mercurio usando el método de referencia ASTM E337-84 que establece las condiciones para la recolección de este tipo de parámetro. El coeficiente de correlación que obtuvieron fue de 0.91 y en general observaron que las medidas del DHT22 tendieron a quedar ligeramente por debajo de las del termómetro de referencia. Después de realizar los ajustes pertinentes, usaron la ecuación para ajustar los valores de salida del DHT22 y como resultado de ello se observó que aplicando el ajuste en el error de medición con el DHT22, este se redujo del 9% a un 4% (Koestoer et al., 2019).

La forma de comunicar la información es otro aspecto del monitoreo con SBC. En la India se condujo un estudio donde se evaluó la calidad del aire interior en espacios ocupados. El

objetivo fue que a través de los hallazgos del estudio se pudiera concientizar a la sociedad de la importancia de vigilar la calidad del aire interior. Para lograr su objetivo utilizaron los SBC siguientes: BME680, SGP30 y CCS811. El primer sensor es conocido y determina la temperatura, humedad y presión del aire; el sensor SGP30 es un sensor de calidad del aire que puede reportar concentraciones de COVT y CO<sub>2</sub> equivalente y finalmente el sensor CCS811 es un sensor de dióxido de carbono. Lo novedoso de este trabajo fue el sistema de comunicación utilizado. Se dispuso de una red de área amplia de baja potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés) que es adecuada para conectividad IoT. Se usó la red LPWAN por que ofrece una conexión en una zona amplia para dispositivos de bajo consumo y baja velocidad de información. Todos estos sensores fueron conectados en paralelo a una placa Arduino con conectividad LORA, que es una tecnología de comunicación inalámbrica parecida a wifi, ideal para comunicación a grandes distancias. Como resultado se obtuvieron datos de calidad de aire interior con respecto al CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> equivalente y COVT. Como se esperaba, el análisis de la información reveló que la calidad del aire en espacios interiores ocupados es muy mala. El resultado tuvo importancia ya que el 90 % del tiempo se suele pasar en espacios interiores (Jose & Sasipraba, 2019).

Los trabajos de monitoreo basados en Arduino y SBC como los anteriores, motivaron el monitoreo de parámetros ambientales en la DACBIOL. En este caso, se evaluó el comportamiento de la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica en dos espacios interiores: un cubículo de profesores y el herbario de la División donde es importante mantener condiciones adecuadas de humedad. Para este estudio se utilizaron dos SBC: el DHT22 que midió temperatura y humedad relativa y el BME280 que además se utilizó para determinar la presión atmosférica del interior. El objetivo fue triple: 1) sentar la base metodológica para el empleo local de tecnología de monitoreo de SBC controlados por Arduino uno, 2) establecer valores base para la temperatura y humedad esperadas en espacios cerrados y 3) estudiar el desempeño de los sensores comparando sus mediciones con las de una estación meteorológica portátil comercial marca Davison. El estudio concluyó que el sensor DHT22 tuvo buen desempeño al determinar la temperatura y humedad interiores y que el sensor BME680 tuvo un desempeño adecuado en la determinación de la presión atmosférica (Bolaina, 2020).

La condición de aislamiento durante la pandemia de COVID-19 y la importancia de mantener los espacios interiores ventilados propició también estudios de la calidad del aire en espacios interiores. Un estudio realizado en la universidad de Ulster, en Reino Unido, demostró que existe una correlación negativa ( $r \cong -0.6$ ) entre la humedad relativa y la calidad del aire ambiente interior de espacios ocupados. El estudio se realizó durante la pandemia de COVID-19, situación que obligó a muchas personas a permanecer dentro de sus casas. Lo interesante de este estudio fue que se utilizó un sensor BME680, considerado un SBC, conectado a un microcontrolador ESP32 también de bajo costo económico.

Este sensor además de medir temperatura, humedad y presión del aire, se utilizó para determinar la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COVs) de manera indirecta a través de medir la resistencia del aire. Con aire limpio la resistencia fue alta y del orden de 800 k $\Omega$ , en cambio el aire contaminado fue del orden de 10 k $\Omega$ . Como fuente de contaminación emplearon spray desinfectante en aerosol y varitas de incienso. Para probar la respuesta del sensor a la presencia de los COVs, mantuvieron cerrado la fuente a dos metros y medio del sensor, luego abrieron y cerraron las puertas y ventanas del espacio bajo estudio (una cocina y un estudio) con el objeto de observar los cambios en la resistencia del aire. Finalmente concluyeron que el sistema puede ser útil para controlar la ventilación mediante un sistema del internet de las cosas que abra una ventana para ventilar el espacio (Wall et al., 2021).

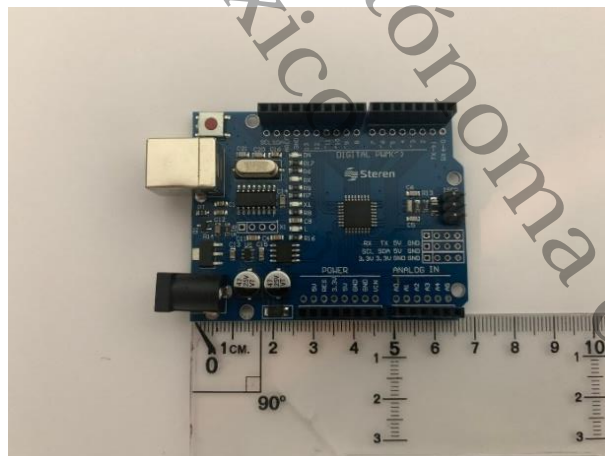
## 5. Marco Teórico

### 5.1. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar. Dentro del ecosistema de Arduino se encuentra el software Arduino IDE y las diversas placas de Arduino que son usadas incluso para crear dispositivos complejos a un bajo costo y fácil accesibilidad. Arduino uno (Figura 1) es una de las tarjetas electrónicas más conocidas en el mundo de la electrónica. Esta tarjeta cuenta con el microprocesador Atmega328P que es como su cerebro programable. La tarjeta tiene pines digitales y analógicos que permiten conectar y programar sensores y módulos (periféricos) para que interactúen con el exterior. El software para programar la tarjeta, Arduino IDE, es libre y el programa se puede guardar en la memoria de Arduino ya que esta tarjeta cuenta con una conexión o puerto USB por el que se conecta a una computadora (Arduino, 2018).

**Figura 1**

*Tarjeta Arduino UNO*



### 5.2. Sensores

Los sensores son dispositivos que capturan y traducen la información del entorno físico en impulsos eléctricos las cuales son procesadas y transmitidas a otros dispositivos electrónicos. Estas señales generalmente son procesadas por una computadora donde puede ser mostrado

o leído por el usuario y existen diversas clasificaciones de sensores dependiendo de su aplicación (Javaid et al., 2021).

En el desarrollo de SBC para la calidad de aire se consideran las variables meteorológicas y las variables de la calidad de aire. Las variables meteorológicas incluyen principalmente la temperatura, la presión barométrica y la humedad relativa, mientras que las variables de la calidad de aire incluyen la detección de contaminantes criterio como el Ozono ( $O_3$ ), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de azufre ( $SO_2$ ), Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ) y partículas en suspensión ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ). En el mercado cada sensor tiene un intervalo de operación para conocer qué tipo de sensor será útil en el área de la calidad de aire (García & Rico, 2019).

Los SBC cuentan con tres principios de operación, los electroquímicos, los piezoeléctricos y los ópticos. Los sensores electroquímicos que se clasifican en tres subtipos, potenciométricos, voltimétricos y conductimétricos, cada uno presenta un principio físico de operación. Los sensores piezoeléctricos se basan en la micro gravimetría, la medición de cambios de masa que ocurren como una característica de la interacción de las especies químicas con el sensor. Los sensores ópticos tienen como principio la detección de Los sensores ópticos se basan en la detección de un haz de luz u otras ondas electromagnéticas durante la interacción con las especies químicas (Rico, 2018).

### 5.3. BME680

El sensor BME680 (Figura 2) es un sensor digital que mide la altitud, los COV's (Componentes Orgánicos Volátiles), humedad relativa, la presión barométrica y la temperatura del aire. Además, tiene la capacidad de medir el índice de calidad de aire (IAQ) según la norma ISO 16000-29, que especifica los métodos de prueba para la detección de COV's. Este dispositivo puede operar con alta linealidad y precisión y es utilizado principalmente en aplicaciones móviles de bajo consumo de energía. Posee un consumo optimizado y estabilidad a largo plazo, lo que permite su integración en varios proyectos tecnológicos. (Bosch Sensortec, 2024).

Algunas de sus aplicaciones son:

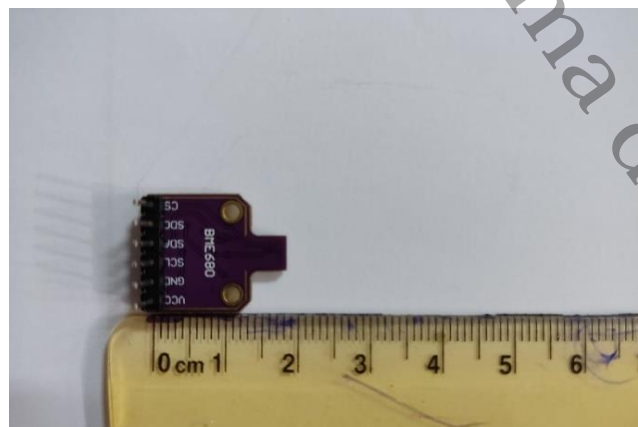
- Calidad de aire interior
- Automatización y control en el hogar
- Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés)
- Pronosticar el tiempo
- Mejora del GPS
- Navegación interior (detección de cambio de piso, detecciones de ascensor)
- Aplicaciones de navegación, ocio y deportes al aire libre.
- Indicaciones de velocidad vertical (velocidad de subida y bajada).

Algunos dispositivos en los que es posible encontrarse son los siguientes:

- Teléfonos móviles, tablets y dispositivos GPS.
- Estaciones meteorológicas domésticas.
- Relojes inteligentes.
- Electrodomésticos.
- Sistemas de navegación
- Dispositivos IoT.

## Figura 2

Sensor BME680



#### 5.4. Shield Datalogger

Este escudo o shield (Figura 3) le brinda la capacidad a Arduino Uno, Leonardo, o MEGA el almacenamiento de datos en una tarjeta SD con una mínima configuración. El Shield incorpora un reloj en tiempo real (RTC) y una batería que permite el registro de la fecha y hora actual. El lector SD que incorpora el shield permite la lectura en formato FAT16 o FAT32 de memorias hasta de 32GB. La tarjeta también contiene un espacio para soldar sus componentes y contener su circuito en la misma tarjeta. El Shield tiene un conjunto de headers para Arduino que permiten apilar más componentes encima (Adafruit Industries, 2024).

#### Figura 3

*Shield Datalogger V1.0*

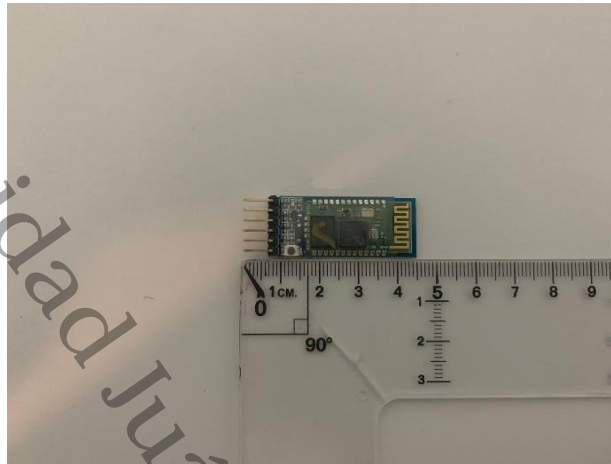


#### 5.5 HC-05

El HC-05 es un módulo Bluetooth con conectividad SPP que permite enviar datos de forma secuencial como en un puerto serie. Su velocidad de transmisión predeterminada es de 38400 baudios (Figura 4). Este módulo en particular tiene la capacidad de actuar en modo esclavo o modo maestro. En modo esclavo solo recibe información, pero en modo maestro además de recibirla puede enviarla. El intervalo de velocidad del dispositivo abarca opciones como 9600, 19200, 38400, 57600, 15200, 230400 y 460800 baudios. Cuando el HC-05 opera en modo esclavo, el LED rojo parpadea en intervalos de 1 segundo (Itead Studio, 2010).

**Figura 4**

Modulo HC – 05



## 5.6. Parámetros Meteorológicos Básicos

### 5.6.1. Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética de una sustancia, es la cantidad más medida en la atmósfera y su temperatura se mide en grados Celsius (°C) siendo un factor importante en la determinación del clima de una región. Para definir una escala arbitraria de temperatura se seleccionan dos puntos, normalmente el de congelación y la ebullición. La escala con la que se registran los datos meteorológicos frecuentemente es en grados Celsius el cual está dividido en un intervalo de 100 grados y Fahrenheit (°F) que está dividido en 180 (Willett & Sanders, 1959).

### 5.6.2. Humedad Relativa

Es una medida del contenido de vapor de agua del aire. Popularmente se utiliza como sinónimo de humedad relativa. La humedad relativa se expresa en porcentaje (%), cuya formula es la siguiente:

$$\% = e/e_m$$

Donde  $e$  es la presión de vapor y  $e_m$  es la presión de saturación del vapor a la temperatura existente. La presión de vapor de saturación es la presión de vapor máxima que puede existir en la atmósfera; cualquier aumento adicional de  $e$  más allá de  $e_m$  conduce a la sobresaturación

y a la condensación del aire en exceso del vapor. La humedad relativa determina la tasa de evaporación en el aire (Willett & Sanders, 1959).

### 5.6.3. Presión Atmosférica

La presión es una fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área, ya sea a través de un gas o líquido. Tiene como unidad el pascal (Pa) que es igual a la unidad de Newton por metro cuadrado (N/m<sup>2</sup>). La presión atmosférica se mide a través del barómetro, el cual es un tubo lleno de mercurio en un recipiente de mercurio abierto a la atmósfera. La presión se expresará a través de la altura de la columna de mercurio, que cambiará dependiendo de las condiciones climáticas locales (Cengel & Boles, 2013). Para calcular la presión se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_{atm} = \rho gh$$

Donde  $\rho$  es la densidad del mercurio,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $h$  la altura de la columna del mercurio. En estaciones meteorológicas típicas, la presión se da en milibares (mbar) o hectopascales (hPa). Las equivalencias son 1 hPa=100 Pa = 1 mbar.

### 5.7. Índice De Calor

El índice de calor es la temperatura que siente el cuerpo humano cuando la humedad relativa y la temperatura del aire se combinan. El índice de calor es importante, debido a que está relacionado con la comodidad y salud del cuerpo. De calentarse, el cuerpo comenzará a transpirar o sudar para regular su temperatura, en cambio, si la humedad relativa es alta, el cuerpo disminuye la capacidad de transpirar (NWS, 2024). El índice de calor es una herramienta usada por departamentos de salud y meteorología para informar al público en general cuando la temperatura y la humedad ha alcanzado niveles de peligrosidad (Opitz, 2016)

### 5.8. Olas De Calor

Las olas de calor son eventos extremos a altas temperaturas. Se entiende por ola de calor como un episodio de altas temperaturas que permanece durante cierto periodo de tiempo. La definición de ola de calor varía dependiendo del autor. El Sistema Meteorológico Nacional (SMN) define como onda de calor, un calentamiento importante del aire o invasión de aire muy caliente en una zona extensa el cual puede durar unos días a una semana; mientras que la

NOAA la define como una medida precisa de qué tan caliente se siente realmente cuando se agrega la humedad relativa a la temperatura real del aire (Ortiz, 2023). En México, durante el 2023, se presentaron tres eventos de ola de calor de aproximadamente una semana de duración (SSA, 2023).

### 5.9. DHT22

El DHT22 es un sensor digital de temperatura y humedad del aire, de bajo costo. Este sensor está compuesto por un sensor de humedad capacitivo que es un pequeño condensador que consta de un material dieléctrico higroscópico colocado entre dos electrodos (sensor capacitivo). Otro elemento del sensor es un termistor que en esencia es una resistencia térmica que cambia dependiendo de la temperatura. El DHT22 cuenta con un chip que convierte la señal analógica en digital, lo que permite que se pueda utilizar en cualquier microcontrolador. El sensor consume de 3 a 5 voltios y su intervalo de detección de la temperatura es de -40 a 80 °C, con una precisión de  $\pm 0.5$  °C. Para la humedad el intervalo de detección es de 0 a 100% y una precisión del 2 al 5 % (Adafruit Industries, 2021).

### 5.10. LM35

Es un sensor de temperatura de bajo costo que está integrado con un circuito de precisión y un voltaje de salida proporcional a la temperatura en centígrados. Este sensor no requiere ningún tipo de calibración o ajuste externo y tiene un intervalo de detección de la temperatura de -55 a 150 °C, funciona con 5 V. Además, tiene una salida analógica que es proporcional a la temperatura (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

### 5.11. BME280

El BME280 es un sensor digital de bajo costo que mide la humedad, presión y temperatura, logrando un alto rendimiento y usado para un gran número de aplicaciones como el fitness o aplicaciones emergentes de control que requieren de una alta precisión. Este sensor proporciona un tiempo de respuesta rápido y cuenta con una precisión extremadamente alta. Además, presenta menor ruido en comparación a otros sensores como el BME180. Tiene un sensor de temperatura optimizado el cual es utilizado para compensar la presión y la humedad. El BME280 es capaz de utilizar la interfaz de comunicación SPI e I<sup>2</sup>C lo cual significa en términos sencillos que puede transmitir datos usando cuatro pines de conexión (SPI) o tan sólo dos pines (I<sup>2</sup>C), según convenga al programador interesado. Finalmente, la alimentación del

sensor debe estar en el intervalo de 1.71 a 3.6 voltios (Bosch BME280). El sensor no es muy distinto al BME680 en términos de precisión y ambos se pueden usar para IoT, mejora del GPS, automatización del hogar, pronóstico del tiempo, relojes inteligentes, monitoreo de condición física, estaciones meteorológicas domésticas, entre otras aplicaciones.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

## 6. Materiales Y Metodología

La Tabla 1 muestra la lista de los materiales y su costo correspondiente para el desarrollo de los dos dispositivos electrónicos de parámetros meteorológicos: estación fija y estación portátil. Se seleccionó el sensor BME680 debido a su buena precisión y capacidad para medir hasta tres parámetros simultáneamente: temperatura (T), humedad relativa (HR) y presión atmosférica (Patm) del aire ambiente. Para el registro de datos en memoria microSD se empleó un escudo o shield data logger que incorpora un módulo lector de tarjetas y un reloj para el registro de hora y fecha. Para la comunicación inalámbrica se optó por un módulo bluetooth por ser de fácil programación y comunicación en dispositivos Android.

La Tabla 2 muestra la dimensión y los intervalos de operación del sensor BME680 con respecto a la temperatura, la humedad y la presión barométrica. Puede notarse que se trata de un sensor pequeño y que detecta rápidamente cambios en las condiciones atmosféricas, debido a que su tiempo de respuesta es pequeño.

**Tabla 1**

*Materiales para el desarrollo del prototipo medidor de parámetros meteorológicos.*

Prototipo	Componentes utilizados	Costo (pesos mexicanos)
Medición continua	Placas Arduino UNO	\$108
	Sensor BME680	\$241
	Placa Shield Datalogger	\$84
	Batería de litio	\$35
	Tarjeta microSD	\$80
	Cables jumper macho-hembra	\$66
	Cajita de plástico con tapa	\$139
	Soporte o tripié	\$300
Dispositivo bluetooth	Placa Arduino UNO	\$108
	Sensor BME680	\$241
	Modulo Bluetooth HC-05	\$95

Power Bank	\$169
Soporte o tripié	\$300

*Nota: Los precios fueron obtenidos en base al precio del mercado*

**Tabla 2**

*Intervalos de operación del sensor BME680*

Parámetros	Datos técnicos
Dimensiones	18.6 × 16.6 mm
Intervalos de operación	
Presión barométrica	300 – 1100 hPa
Humedad relativa	0 – 100 %
Temperatura	-40 – 85 °C
Precisión del sensor	
Presión barométrica	± 0.12 hPa
Humedad relativa	± 3 %
Temperatura	± 1 °C
Suministro de energía	1.2 – 3.6 V
Interfaz de comunicación	I <sup>2</sup> C y SPI
Tiempo de respuesta	< 1 segundo (para sensores nuevos)

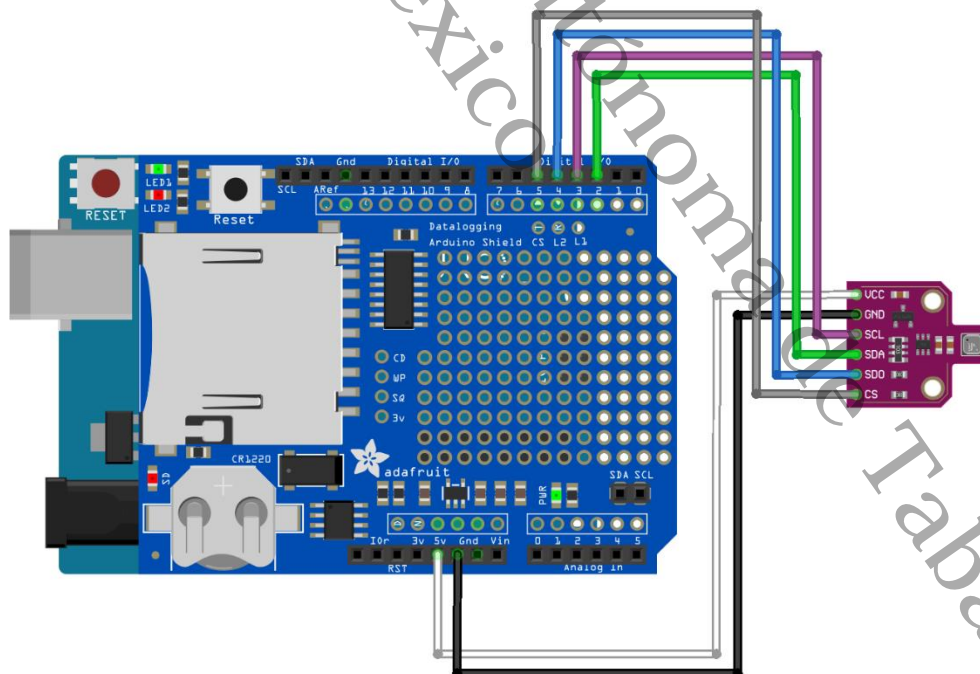
*Nota: información obtenida de la hoja de datos (Bosch Sensortec, 2019).*

## 7. Desarrollo Del Dispositivo Electrónico De Monitoreo Permanente De Temperatura, Humedad Y Presión Atmosférica Del Aire

Se desarrollaron dos prototipos: uno para medición continua de 24 horas por 365 días al año y otro prototipo móvil con comunicación inalámbrica vía bluetooth para la toma de datos en tiempo real. La figura 5 muestra el diseño electrónico del prototipo para medición continua. Este diseño se realizó en una versión anteriormente libre del software Fritzing versión 0.9.3 disponible en la página web <https://fritzing.org/>. Se seleccionó Fritzing porque es una plataforma creativa para el desarrollo de imágenes visuales de diagramas electrónicos básicos. Integra por defecto un listado de imágenes de sensores y componentes como la placa Arduino que se despliegan en un área de diseño para su conexión con líneas de unión que simulan conexiones de cables jumper. Su uso es bastante intuitivo por lo que no se requirió ninguna capacitación.

**Figura 5**

*Diagrama esquemático del BME680 con Shield Datalogger.*



*Nota: Diseño elaborado mediante el programa de Fritzing.*

La Tabla 3 explica el diagrama de conexión del BME680 a la tarjeta Arduino uno de la Figura 5. En general el sensor tiene un pin que se conectó a tierra (GND) y un pin que se conectó a la línea de voltaje del Arduino uno. Los cuatro pines restantes son para obtener la lectura del sensor y se conectaron siguiendo el protocolo de conexión SPI (Serial Peripheral Interface).

**Tabla 3**

*Pines para la conexión del BME680 con el Arduino uno.*

Shield Datalogger	Pines del BME680	Color del jumper
5V	VCC	Blanco
GND	GND	Negro
SDA	Pin 2	Verde
SCL	Pin 3	Morado
SDO	Pin 4	Azul
CS	Pin 5	Gris

Para programar el dispositivo, se utilizó el software libre Arduino IDE versión 2.3.0 disponible para su descarga gratuita en <https://www.arduino.cc/en/software>. El programa para ambos prototipos se dividió en cuatro secciones: 1) Librerías del programa, 2) Definición de variables, 3) Función setup() y 4) Función loop().

### 7.1. Librerías Del Programa

Esta sección contiene las seis librerías necesarias para que Arduino uno se entienda con el sensor BME680 y el escudo conocido como shield data logger. Por ejemplo, la librería *Adafruit\_BME680* contienen funciones para inicializar el sensor BME680 o sensor de presión, y obtener las lecturas de temperatura, humedad y presión directamente. El sensor de presión tiene seis pines, dos pines de alimentación y los cuatro restantes son para la comunicación por la interfaz SPI, de ahí la existencia de la librería *SPI.h*.

**Figura 6**

Librerías para el sensor BME680

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME680.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
```

**7.2. Definición De Variables Y Configuración**

En esta sección se definieron y crearon diversas variables. Las variables *BME\_CS*, *BME\_SCK*, *BME\_MISO*, *BME\_MOSI* le indican a Arduino uno en que pines digitales está conectado el sensor de presión. La variable *dataFile* de tipo *File* define un objeto tipo archivo donde se guardarán los datos medidos, así como la hora y fecha de la medición. La variable *rtc* de tipo *RTC\_DS1307* se utilizó para almacenar la fecha y hora girada por el reloj del módulo RTC del escudo shield data logger. Por último, tenemos las variables *SUMA1*, *SUMA2*, *SUMA3* de tipo *float* utilizadas en el ciclo *for* para guardar la suma acumulada de las lecturas de T, HR y Patm.

**Figura 7**

Variables y configuraciones utilizadas para el sensor BME680

```
#define BME_CS 5
#define BME_SCK 3
#define BME_MISO 4
#define BME_MOSI 2

float SUMA1;
float SUMA2;
float SUMA3;
// Configura el sensor BME680
Adafruit_BME680 bme(BME_CS, BME_MOSI, BME_MISO, BME_SCK);
File dataFile;
RTC_DS1307 rtc;
```

### 7.3. Función Setup()

La función `setup()` tuvo como principal objetivo la inicialización correcta de los componentes que están conectados en el Arduino UNO.

- La instrucción `Serial.begin(9600)` inicializo la comunicación con el monitor serie de Arduino IDE a una velocidad de transmisión de 9600 baudios. Esto fue necesario para hacer análisis del dispositivo: verificación de su buen funcionamiento, mantenimiento, etcétera.
- En general la instrucción `Serial.print()` se utilizó para mandar mensajes de indicación acerca de la inicialización correcta de un componente del dispositivo. Por ejemplo, en las ocasiones que un cable jumper se desconectó o tuvo falla, el sensor BME680 no se inició correctamente y el mensaje fue: " *No se encontró el sensor BME680, revisa la conexión*". Esta fue la función de los condicionales `if` en toda esta sección del programa.
- Las instrucciones `dataFile.print()` dentro del `if(dataFile)` tuvieron como objetivo escribir en un archivo con extensión `*.csv` las cinco columnas: Date, Time, Temp, Hum y Pres; que hacen alusión a la fecha, hora, temperatura, humedad y presión atmosférica del aire. El archivo se abre con la instrucción `SD.open()` y después de escribir se cerró con la instrucción `dataFile.close()`.

**Figura 8***Configuración de los componentes del sensor BME680*

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Listo");

  while (!Serial) {}; // Esperar a que se abra el monitor serial
  Serial.println(F("BME680 Test - Interfaz SPI"));
  if (!bme.begin()) {
    Serial.println(F("No se encontró el sensor BME680, revisa la conexión."));
    while (1);
  }

  // Inicializar la tarjeta SD
  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println(F("No se pudo iniciar la tarjeta SD. Asegúrate de que está correctamente
insertada."));
    while (1);
  }

  // Inicializar el RTC
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println(F("No se pudo encontrar el módulo RTC."));
    while (1);
  }
  if (!rtc.isrunning()) {
    Serial.println(F("La alimentación del módulo RTC se perdió. Se establecerá la hora."));
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }

  // Abrir el archivo para escritura (crea uno nuevo si no existe)
  dataFile = SD.open("data.csv", FILE_WRITE);

  if (dataFile) {
    dataFile.print("Date");      dataFile.print(",");
    dataFile.print("Time");     dataFile.print(",");
    dataFile.print("Temp");     dataFile.print(",");
    dataFile.print("Hum");      dataFile.print(",");
    dataFile.print("Pres");     dataFile.print(",");
    dataFile.println();
    dataFile.close();
  } else {
    Serial.println(F("Error al abrir el archivo."));
  }
}

```

**7.4. Función Loop()**

Esta función se utilizó principalmente para tomar las lecturas del sensor de presión promediadas cada tres minutos y guardar estos registros en la tarjeta de memoria microSD.

- El ciclo *for* toma las lecturas de temperatura, humedad y presión cada treinta segundos o cada 30, 000 milisegundos. Los valores los guarda en la variable suma

correspondiente y después de salir del ciclo *for*, cada parámetro es promediado al dividir la suma correspondiente entre 6 (6 porque hay 6 periodos de 30 segundos en 3 minutos). Las lecturas estuvieron en °C, % y mbar respectivamente.

- Las instrucciones `String(now.day())` y `String(now.hour())` toman el dato de la hora y la fecha en el que se obtuvo el promedio de tres minutos. Esta información la toma del reloj integrado en el escudo shield data logger.
- Las instrucciones `Serial.print()` se utilizaron para imprimir y por lo tanto mostrar los valores tomados del BME680 y del reloj en el monitor serie. Esto permitió verificar que el dispositivo estuviera midiendo valores correctamente. De no ser así, se procedió a revisar los sensores y el circuito electrónico, concretamente los jumpers de conexión.
- Finalmente, la instrucción `dataFile.print()` se utilizó para imprimir los datos en el archivo `data.csv`. Esta escritura implicó abrir y cerrar el archivo cada tres minutos aproximadamente.

**Figura 9**

Bucle del código BME680

```

void loop() {
  SUMA1 = 0;
  SUMA2 = 0;
  SUMA3 = 0;

  for (int i = 0; i < 6; i++) {
    bme.performReading();
    SUMA1 += bme.readTemperature();
    SUMA2 += bme.readHumidity();
    SUMA3 += bme.readPressure() / 100.0;
    delay(30000);
  }

  // Calcular promedio
  float promedio_temperatura = SUMA1 / 6;
  float promedio_humedad = SUMA2 / 6;
  float promedio_presion = SUMA3 / 6;

  DateTime now = rtc.now();
  String fecha = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" + String(now.year());
  String hora = String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" +
String(now.second());

  // Imprimir en el monitor serial
  Serial.print(fecha);           Serial.print(F(" "));
  Serial.print(hora);           Serial.print(F("\t"));
  Serial.print(promedio_temperatura); Serial.print(F("\t"));
  Serial.print(promedio_humedad); Serial.print(F("\t"));
  Serial.print(promedio_presion); Serial.print(F("\t"));
  Serial.println(F(""));

  // Abrir el archivo para escritura y agregar datos
  dataFile = SD.open("data.csv", FILE_WRITE);

  if (dataFile) {
    dataFile.print(fecha);           dataFile.print(",");
    dataFile.print(hora);           dataFile.print(",");
    dataFile.print(promedio_temperatura); dataFile.print(F(","));
    dataFile.print(promedio_humedad); dataFile.print(F(","));
    dataFile.print(promedio_presion); dataFile.print(F(","));
    dataFile.println();
    dataFile.close();
  } else {
    Serial.println(F("Error al abrir el archivo."));
  }
}

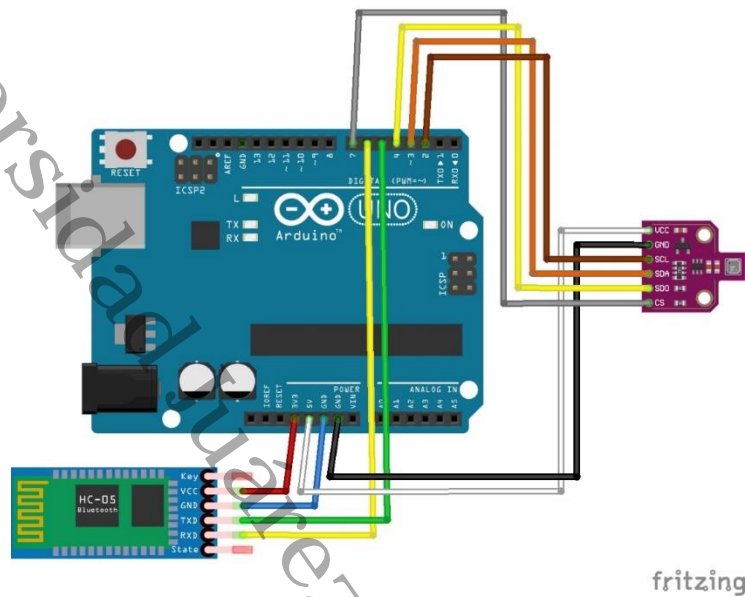
```

## 8. Modelo Del Sensor BME680 Con El Dispositivo HC-05

La Figura 10 presenta el diseño electrónico del dispositivo integrado solo por Arduino UNO, el sensor BME680 y el módulo HC-05 para la transmisión de datos vía Bluetooth. Se destacan los esquemas de conexión esenciales para el correcto funcionamiento de la estación. La Tabla 4 indica la conexión electrónica. En este caso, como el módulo HC-05 utilizó el pin digital 5 de Arduino uno, el pin CS del BME680 se conectó al pin 7 del Arduino.

**Figura 10**

Diagrama esquemático de BME680 con HC-05.



Nota: Diseño elaborado mediante el programa de Fritzing.

**Tabla 4**

Conexiones del BME680 con HC – 05

Puertos	BME680	HC-05	Color
3 V		VCC	Rojo
GND		GND	Azul
5V	VCC		Blanco
GND	GND		Negro
SCL	Pin 2		Café
SDA	Pin 3		Naranja
SDO	Pin 4		Amarillo
TXD		Pin 5	Verde
RXD		Pin 6	Amarillo
CS	Pin 7		Gris

La elección del módulo HC-05 se basó principalmente en la facilidad para interconectarlo y programarlo. Una de sus ventajas destacadas fue su capacidad de mantener la comunicación y reportar datos incluso en situaciones donde la conexión a internet puede verse interrumpida. Aunque la conexión Bluetooth es limitada en alcance en comparación a una conexión de internet tradicional, su capacidad para continuar transmitiendo datos la convierte en una herramienta fiable para la recopilación y transmisión de información. El código de este programa, también se dividió en cuatro partes. Mucho del código de programación fue semejante al anterior así que a continuación se destacan las líneas que se anexaron para la comunicación por bluetooth.

### 8.1. Librerías Del Dispositivo Bluetooth

En esta sección se declaró la librería *SoftwareSerial* que es una librería que Arduino IDE integra por defecto. Esta librería se utilizó para habilitar la comunicación por puerto serie del módulo HC-05. Esto también permitió la utilización de funciones para configurar inicialmente el módulo a través de comandos AT. En esta sección se descartaron la declaración de las librerías SPI, SD, Wire y RTCLib necesarias en el dispositivo anterior.

#### Figura 11

*Librerías utilizadas para el módulo HC – 05*

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME680.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <SoftwareSerial.h>
```

### 8.2. Variables Y Configuración

Para la comunicación bluetooth se creó la variable BT de tipo *SoftwareSerial*, la cual establece los pines para transmisión TX y recepción RX mediante los cuales el módulo HC – 05 se comunicará o interaccionará con Arduino. También se creó la variable *bme* de tipo ADAFRUIT\_bme680 para captar las lecturas del sensor de presión. Se descartaron las

variables *dataFile* de tipo archivo y la variable *rtc* para el control de la tarjeta microSD y el reloj RTC. Además, se creó la variable *SUMA* como variable aditiva dentro del ciclo *for*.

### Figura 12

*Variables y configuraciones utilizadas para el módulo HC – 05*

```
#define BME_SCK 2 //SCL
#define BME_MOSI 3 //SDA
#define BME_MISO 4 //SDC
#define BME_CS 7 // cs

float SUMA1;
float SUMA2;
float SUMA3;

SoftwareSerial BT(5,6);
Adafruit_BME680 bme(BME_CS, BME_MOSI, BME_MISO, BME_SCK); // Configurar el sensor BME680
```

### 8.3. Void Setup

Aquí la nueva instrucción es *BT.begin(38400)* que inicializa el módulo bluetooth a una velocidad de transmisión de 38400 baudios. Las instrucciones dentro del *while* y del *if* tiene por objeto, como ya se explicó, verificar que el sensor BME680 funcione correctamente.

### Figura 13

*Configuración de los componentes del módulo HC – 05*

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Listo");
  BT.begin(38400);

  while (!Serial) {}; // Esperar a que se abra el monitor serial
  Serial.println(F("BME680 Test - Interfaz SPI"));
  if (!bme.begin()) {
    Serial.println(F("No se pudo encontrar un sensor BME680, revisa la conexión."));
    while (1);
  }
}
```

#### 8.4. Void Loop

La función *loop()* es una función equivalente a un ciclo *for*. Se ejecuta indefinidamente. Las instrucciones que contienen se interpretaron de la siguiente forma:

- El ciclo *for* toma lecturas de temperatura, humedad y presión cada 15 s o 15 000 milisegundos. Cuando finaliza, las variables *SUMA* definidas previamente contienen la suma de las cuatro lecturas realizadas dentro del ciclo *for*. Por ejemplo, *SUMA1* Contiene la suma de las cuatro lecturas de temperatura tomada cada 15 segundos.
- La variable *data* de tipo *String* o tipo cadena, almacena una cadena de texto con los valores promedio de temperatura, humedad y presión. Como hay cuatro periodos de 15 segundos en un minuto, de ahí que el promedio se obtenga dividiendo cada suma correspondiente entre 4.
- La instrucción *BT.println(data)* hace que esta información se escriba o esté disponible en el módulo HC-05 que funciona por defecto en modo esclavo.
- Las instrucciones *Serial.print()* simplemente escriben estos valores al monitor serie de Arduino IDE. Ya se explicó que esto tiene por objetivo verificar el buen funcionamiento del dispositivo.
- La instrucción *BT.available()* se utilizó para verificar si había datos disponibles para recibir. Cuando fue así estos se escribieron en el módulo HC-05 con la instrucción *Serial.write(BT, read())*. Esta es la información que posteriormente se muestra en la pantalla de un celular con sistema Android que tiene instalada la aplicación *Serial Bluetooth Terminal* que se conecta al módulo HC-05 y permite visualizar la información que tienen disponible (Figura 15).

**Figura 14***Bucle del módulo HC – 05*

```
void loop() {
  float temperatura, humedad, presion;

  SUMA1 = 0;
  SUMA2 = 0;
  SUMA3 = 0;

  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    bme.performReading();
    temperatura = bme.temperature;
    humedad = bme.humidity;
    presion = bme.pressure / 100;

    SUMA1 += temperatura;
    SUMA2 += humedad;
    SUMA3 += presion;

    delay(15000); // 15 segundos
  }

  String data = String(SUMA1 / 4, 2) + " °C " + String(SUMA2 / 4, 2) + " % " +
String(SUMA3 / 4, 2) + " mba"; // Redondea a 2 decimales
  BT.println(data);

  Serial.print(SUMA1 / 4); Serial.print(F("\t"));
  Serial.print(SUMA2 / 4); Serial.print(F("\t"));
  Serial.print(SUMA3 / 4); Serial.print(F("\t"));
  Serial.println(F(""));

  if (BT.available())
    Serial.write(BT.read());

  if (Serial.available())
    BT.write(Serial.read());

  delay(60000); // 1 minuto
}
```

Figura 15

Datos obtenidos del sensor a través de la aplicación Serial Bluetooth Terminal

Timestamp	Temperature (C)	Humidity (%)	Pressure (mba)
13:26:28.500	26.68	57.65	1016.00
13:27:30.405	26.70	57.41	1016.00
13:28:32.728	26.77	57.52	1016.00
13:29:34.533	26.70	57.75	1016.00
13:30:36.424	26.56	57.81	1016.00
13:31:38.759	26.45	57.38	1016.00
13:32:40.608	26.20	58.41	1016.00
13:33:42.404	26.15	60.30	1016.00
13:34:44.795	26.29	60.10	1016.00
13:35:46.657	26.42	59.06	1016.00
13:36:48.436	26.52	56.92	1016.00
13:37:50.839	26.59	59.40	1016.00
13:38:52.601	26.60	57.06	1016.00
13:39:54.466	26.54	56.21	1016.00
13:40:56.813	26.61	54.65	1016.00

Figura 16

Funcionamiento del módulo bluetooth en el Arduino IDE

```

79 //dataFile.print(bme.pressure / 100.0);      dataFile.print(",");
80 //dataFile.println();
81 //dataFile.close(); // Cierra la conexión al archivo después de escribir
82 //} else {
83 // Serial.println(F("Error al abrir el archivo de datos.");//pq falla?
84 //}
85
86 //Serial.print(fecha);                      Serial.print(F(" "));
87 //Serial.print(hora);                       Serial.print(F("\t"));
88 Serial.print(bme.temperature);             Serial.print(F("\t"));
89 Serial.print(bme.humidity);                Serial.print(F("\t"));
90 Serial.print(bme.pressure / 100.0);        Serial.print(F("\t"));
91 Serial.println(F(""));
92
93 if (BT.available())
94   Serial.write(BT.read());
95
96 if (Serial.available())
97   BT.write(Serial.read());
98
99 delay(10000);
100 }

```

Salida Monitor Serie x

Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'Arduino Uno' a 'COM4')

```

09:52:11.711 -> 26.04 69.07 1015.67
09:52:32.690 -> 26.02 69.08 1015.63
09:52:43.148 -> 25.96 68.67 1015.64
09:52:53.620 -> 25.86 68.54 1015.64
09:53:04.079 -> 25.80 69.19 1015.64

```

### 8.5. Desarrollo De La Base De Datos

Antes de operar el prototipo de manera continua, se realizaron pruebas de medición por intervalos de dos o más horas y se analizó la información generada y el desempeño del dispositivo. El análisis y evaluación del desempeño consistió en lo siguiente:

- Que no existieran valores negativos de temperatura, humedad relativa y presión. Dichos valores solo indicarían fallo de los sensores, las conexiones o el mismo Arduino.
- Que los valores de humedad relativa estuvieran entre cero y 100 %.
- Que la presión atmosférica local estuviera alrededor de 1013.25 mbar ya que Villahermosa está a pocos metros sobre el nivel medio del mar.
- Verificación del intervalo de las temperaturas medidas. Por el tipo de región, no tienen sentido lecturas cercanas a 0°C. Esto indicaría falla en el sensor o las conexiones del sensor.
- Que no existan registros incorrectos de fecha y hora. Esto indicaría falla en el reloj o que su batería está fallando.
- Detectar fallas en la escritura del archivo de datos. Indicaría falla en el lector SD.
- Al interrumpir la alimentación eléctrica, se verificó que el dispositivo siguiera funcionando una vez que se restableciera la energía.

Posteriormente se montó el equipo en un tripie metálico y se dejó operando en el exterior del edificio del Área de la Academia de Ciencias Básicas bajo techo a partir del 24 de abril del 2023 (Figura 20). Las lecturas de temperatura, humedad relativa del aire y presión atmosférica se registraron y almacenaron en la tarjeta microSD del dispositivo cada tres minutos por 24 horas por siete días. Al final de cada periodo, los datos se descargaron para su validación en un archivo de Excel. Este procedimiento fue repetitivo y generó la primera base de datos de parámetros meteorológicos básicos medidos en DACBIOL durante el año 2023 con SBC. El proceso de validación fue semejante al descrito anteriormente.

También se recopilaron los datos meteorológicos de la estación Villahermosa y Aeropuerto del municipio del Centro, Tabasco, del año 2023. La idea fue hacer una comparación sencilla de los datos observados en DACBIOL y los datos observados en estas dos estaciones que llevan años funcionando y cuyos datos están bien validados. Estas estaciones cumplieron la función de estaciones de referencia. Los datos se importaron de la Base de Datos de Superficie de la

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de Norte América. Este procedimiento se realizó en *RStudio* con el paquete *worldmet* que contiene funciones de alto nivel para conectarse al repositorio de la NOAA vía internet. Como los datos ya están validados, solo fue necesario ajustar los datos a la hora local de la región (GMT-6) (Figura 17).

**Figura 17**

*Base de datos de los parámetros ambientales en Excel*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	date	Ta	HR	Patm	Hora	Mes	dateA2	Ta2	Patm2	HR2	Mes2	Hora2
2	27/04/2023 14:20	28.9	71.1	1004	14	4	31/12/2022 18:00	25	NA	88.71	12	18
3	27/04/2023 14:20	30.5	69.9	1003.9	14	4	31/12/2022 19:00	25	NA	94.20	12	19
4	27/04/2023 14:24	32.6	57.8	1004	14	4	31/12/2022 20:00	24	1015.4	94.17	12	20
5	27/04/2023 14:27	35.1	53.3	1003.9	14	4	31/12/2022 21:00	NA	NA	NA	12	21
6	27/04/2023 14:30	36.8	52.9	1003.9	14	4	31/12/2022 22:00	NA	NA	NA	12	22
7	27/04/2023 14:33	37.7	52	1003.8	14	4	31/12/2022 23:00	NA	NA	NA	12	23
8	27/04/2023 14:36	38.2	52	1003.7	14	4	01/01/2023 00:00	NA	NA	NA	1	0
9	27/04/2023 14:39	38.5	52	1003.7	14	4	01/01/2023 01:00	NA	NA	NA	1	1
10	27/04/2023 14:42	38.6	55.4	1003.6	14	4	01/01/2023 02:00	NA	NA	NA	1	2
11	27/04/2023 14:45	38.8	53.7	1003.5	14	4	01/01/2023 03:00	NA	NA	NA	1	3
12	27/04/2023 14:48	38.9	53	1003.5	14	4	01/01/2023 04:00	NA	NA	NA	1	4
13	27/04/2023 14:51	39	52.2	1003.4	14	4	01/01/2023 05:00	22	1015.1	94.09	1	5
14	27/04/2023 14:54	38.9	52	1003.4	14	4	01/01/2023 06:00	22	NA	94.09	1	6
15	27/04/2023 14:57	38.9	53	1003.3	14	4	01/01/2023 07:00	23	NA	98.04	1	7

## 8.6. Estudio Del Comportamiento Temporal De Los Parámetros Meteorológicos

Como primer paso, se estableció un resumen estadístico de los datos medidos en el aire ambiente de la DACBIOL con el dispositivo fijo integrando el sensor BME680, de ahora en adelante la estación DACBIOL. Esto sirvió para establecer los primeros valores base de la presión, humedad relativa y presión atmosférica en el 2023 medidos en DACBIOL.

A continuación, se estudió el comportamiento temporal de los tres parámetros meteorológicos considerados en este trabajo: Presión, humedad y temperatura. Se visualizaron las tendencias horarias de los tres parámetros y se determinaron las horas del día donde alcanzan su valor

máximo y mínimo, principalmente para la humedad relativa y la temperatura del aire. Este comportamiento se comparó con lo observado en las estaciones Villahermosa y Aeropuerto (de ahora en adelante las estaciones de referencia) y se comprobó la coherencia de los datos de la estación DACBIOL. En cuanto a la presión atmosférica, se calculó el valor promedio para establecer la presión media atmosférica local en ciencias Biológicas.

Para generar las gráficas de tendencia horaria se hizo lo siguiente: se agruparon todas las lecturas de un parámetro registradas a la misma hora del día sin importar la fecha. Esta tarea se realizó de manera automática en Excel. En el análisis de la tendencia mensual se siguió el mismo procedimiento: las lecturas se agruparon por meses y posteriormente se detectaron los meses donde la temperatura es máxima o mínima usando principalmente como valor representativo la mediana de los datos ya que es un estadístico más robusto que el promedio estadístico en presencia de datos fuera del intervalo.

También se compararon los datos de temperatura medidos por la estación DACBIOL antes, durante y después de los periodos declarados como segunda y tercera ola de calor de 2023 en México. Estos periodos abarcan del 3 al 12 de mayo y del 1ro al 22 de junio respectivamente. Solo se consideraron estos dos periodos debido a que la estación empezó a entrar en funcionamiento a partir del 24 de abril de 2023. En este caso, el objetivo fue verificar si la estación DACBIOL podía detectar máximos de temperatura por encima de lo habitual. Por tal motivo se analizó el comportamiento de la temperatura no solo durante la semana de ola de calor sino también una semana antes y una semana después.

Finalmente, se utilizaron las lecturas de temperatura para calcular el índice de calor correspondiente y poder clasificar el nivel de riesgo implicado para una persona expuesta al aire ambiente exterior. Uno de los índices más utilizados para la investigación de salud ambiental es la fórmula de Steadman el cual tradujo combinaciones de humedad y temperatura del aire en una sola escala. Esta fórmula fue simplificada por Lans P. Rothfus el cual se denominó índice de calor o “temperatura aparente” con el fin de medir el confort térmico de las personas y el NWS utiliza esta fórmula para sus advertencias de calor excesivo (Anderson et al., 2013).



**Figura 19**

Efectos adversos debido al aumento del estrés térmico (Opitz-Stapleton et al., 2016).

Índice de estrés térmico (°C)	Categorías	Peligros
27 – 32	Precaución	Posible fatiga por exposición prolongada o por actividad física
32 – 41	Extrema precaución	Insolación, calambres y agotamientos por calor debido a la exposición prolongada o actividad física.
41 – 54	Peligro	Insolación, calambres y agotamiento por calor, es probable que se produzcan golpes de calor debido a la exposición prolongada o actividad física.
Mas de 54	Extremo peligro	Alta probabilidad de insolación o golpe de calor debido a la exposición prolongada

$$\begin{aligned}
 HI = & -8.78469476 + 1.61139411 \cdot T + 2.338548839 \cdot HR - 0.14611605 \cdot T \cdot HR - 0.012308094 \\
 & \cdot T^2 - 0.016424828 \cdot HR^2 + 0.002211732 \cdot T^2 \cdot R + 0.00072546 \cdot T \cdot HR^2 \\
 & - 0.000003582 \cdot T^2 \cdot HR^2 \quad (\text{Ecuación 1})
 \end{aligned}$$

## 9. Resultados Y Discusión

Las Figura 20 a 23 muestran el aspecto final de los dispositivos que se generaron en este trabajo. La Figura 20 y 21 muestra el dispositivo para medición permanente y la Figura 22 y 23 muestra el dispositivo para la medición con comunicación bluetooth.

### Figura 20

*Dispositivo para la medición permanente en funcionamiento.*



**Figura 21**

Dispositivo para la medición permanente en vista desde otro ángulo.

**Figura 22**

Dispositivo de conexión bluetooth en funcionamiento.



**Figura 23**

Dispositivo de conexión bluetooth en vista desde otro ángulo.



### 9.1. Estadísticas Generales

La Tabla 5 muestra un resumen estadístico básico de temperatura (°C), humedad relativa (%) y presión barométrica (mbar) de abril de 2023 a febrero de 2024. Las primeras tres columnas corresponden a los datos medidos por la estación DACBIOL con el SBC BME680 y las últimas seis a las estaciones Villahermosa y Aeropuerto. Usando como base solo la mediana, se observó que la temperatura en DACBIOL fue de 29.7 °C y estuvo 1.5 °C por encima de la de Villahermosa y 1.7 °C por encima de la del Aeropuerto. El coeficiente de variación para la temperatura y fue de 12.3% en DACBIOL y de 15.3 y 15.4 % en Villahermosa y Aeropuerto. En lo que respecta a la humedad relativa en DACBIOL fue de 79.9 % y estuvo 5.6 % y 4.3 % por encima de las estaciones de referencia respectivamente. El coeficiente de variación en DACBIOL fue de 14.9 % mientras que en Villahermosa y Aeropuerto fue de 15.7 % y 15.4 % respectivamente. La presión atmosférica en DACBIOL fue de 1013 mbar y fue igual al valor mediano obtenido para las dos estaciones de referencia. El coeficiente de variación para la presión fue de 0.34 % en DACBIOL y Villahermosa y de 0.37 % para la estación Aeropuerto.

No se esperaba que el resumen de estadísticos en DACBIOL fuese parecido al de las estaciones que se usaron para verificar la coherencia de los datos: Villahermosa y Aeropuerto. Es de esperarse que el resumen estadístico de la estación DACBIOL fuese parecido al de las estaciones Villahermosa y Aeropuerto, pues la temperatura, humedad y presión del airea tienden a variar espacial y temporalmente, aunque es común suponer que no (Pérez, Ramírez y Peña, 2016). Lo importante aquí es que, usando la mediana como base, se pudo verificar que los valores medidos por la estación DACBIOL no son exageradamente altos o bajos cuando se compararon con las estaciones de referencia. Por ejemplo, la presión atmosférica. Este es un parámetro que varía significativamente con la altitud. Como las tres estaciones no difieren en una altitud significativa, la presión atmosférica resulto la misma, 1013 mbar.

**Tabla 5***Resumen estadístico de los datos por estación*

Estaciones	Est. DACBiol			Est. Villahermosa			Est. Aeropuerto		
	Ta	HR	Patm	Ta	HR	Patm	Ta	HR	Patm
Parámetros met.									
N	6807	6807	6807	3946	3944	3936	5712	5711	1851
Perdidos	249	249	249	4812	4814	4822	3048	3049	6909
Media	30.0	77.5	1013	28.5	73.0	1013	27.9	76.2	1013
Mediana	29.7	79.9	1013	28.2	74.3	1013	28.0	75.6	1013
Desviación estándar	3.70	11.6	3.50	4.38	11.5	3.49	4.32	16.7	3.76
Mínimo	20.1	29.4	1001	17.5	35.4	1000	15.0	28.7	1001
Máximo	41.3	97.7	1025	41.0	96.3	1025	39.0	100	1026

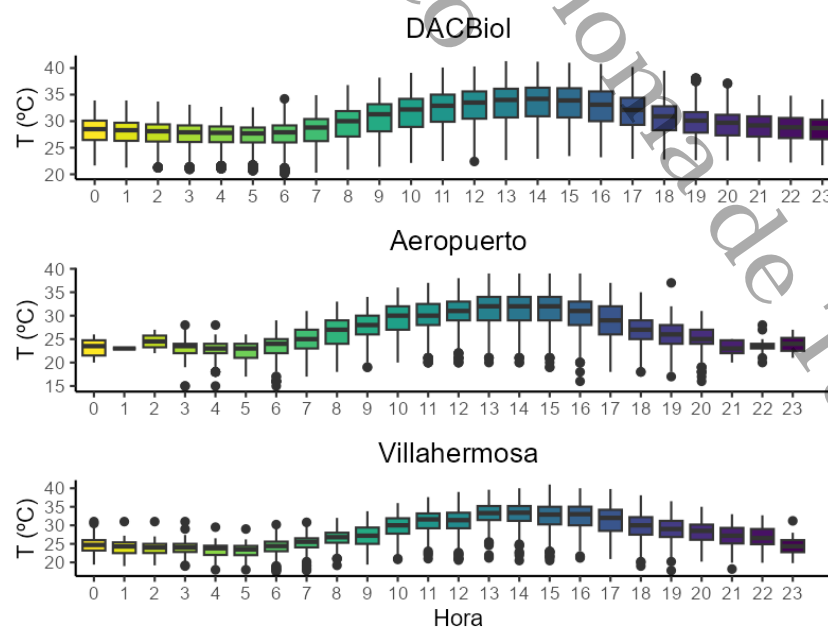
## 9.2. Tendencia Horaria De Los Parámetros

Las Figuras 24, 25, 26 y 27 muestran la tendencia horaria de la temperatura, humedad relativa, presión barométrica e índice de calor durante el año 2023 en las estaciones DACBIOL, Villahermosa y Aeropuerto.

La Figura 24 corresponde a la tendencia horaria de la temperatura y usando como base el valor mediano se obtuvo que la temperatura mínima en DACBIOL fue a las 5 a.m., la máxima fue a las 2 pm y sus valores respectivos fueron 27.7 °C y 34.2 °C. En Villahermosa y Aeropuerto la mínima también ocurrió a las 5 a.m. y sus valores fueron 23.5 °C y 23 °C respectivamente y la temperatura máxima se registró a la 1 y 2 p.m. y sus valores fueron de 33.4 °C y 32 °C respectivamente. De este resultado puede decirse que la tendencia horaria de la temperatura en DACBIOL fue parecida a la tendencia horaria en las dos estaciones de referencia. Ahora podemos concluir que en 2023 en DACBIOL, la temperatura máxima ocurrió a las 2 p.m. y la mínima a las 5 a.m.

**Figura 24**

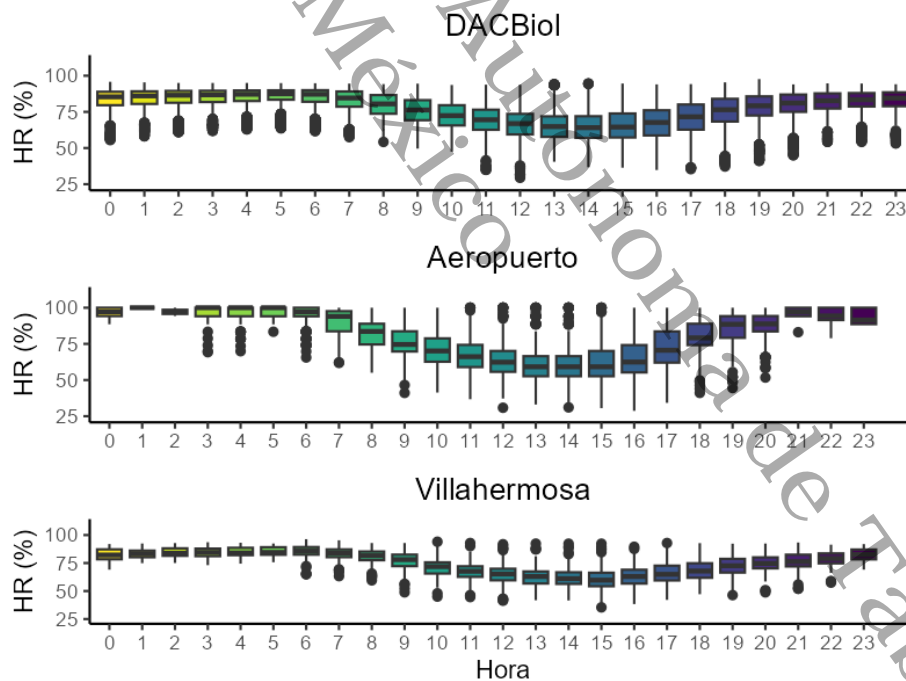
*Tendencia horaria de la temperatura en 2023*



La figura 25 muestra el comportamiento de la humedad relativa en DACBIOL y las dos estaciones de referencia. Con base a la mediana, en la estación DACBIOL la humedad máxima se presentó a las 5 a.m. con un valor de 87.5 % y la mínima se presentó a las 3 p.m. con un valor de 64.1%. En la estación Villahermosa, la humedad máxima registrada fue a las 6 a.m. con un valor de 85.7% y la mínima a las 3 p.m. con un valor de 59.7%. En la estación Aeropuerto la humedad máxima se presentó a la 1 a.m. y de 3 a 5 a.m. con valores del 100% y la mínima de 1 a 3 p.m. con un valor de 59.2%. La tendencia horaria de la humedad en DACBIOL coincidió más con la tendencia horaria en Villahermosa: el mínimo se presentó a la misma hora y el máximo solo una hora antes. Al comparar la tendencia de DACBIOL con Aeropuerto, por lo menos se pudo ver que sus horas de máximo y mínimo caen dentro del intervalo de horas de Aeropuerto.

**Figura 25**

*Tendencia horaria de la humedad relativa en 2023*



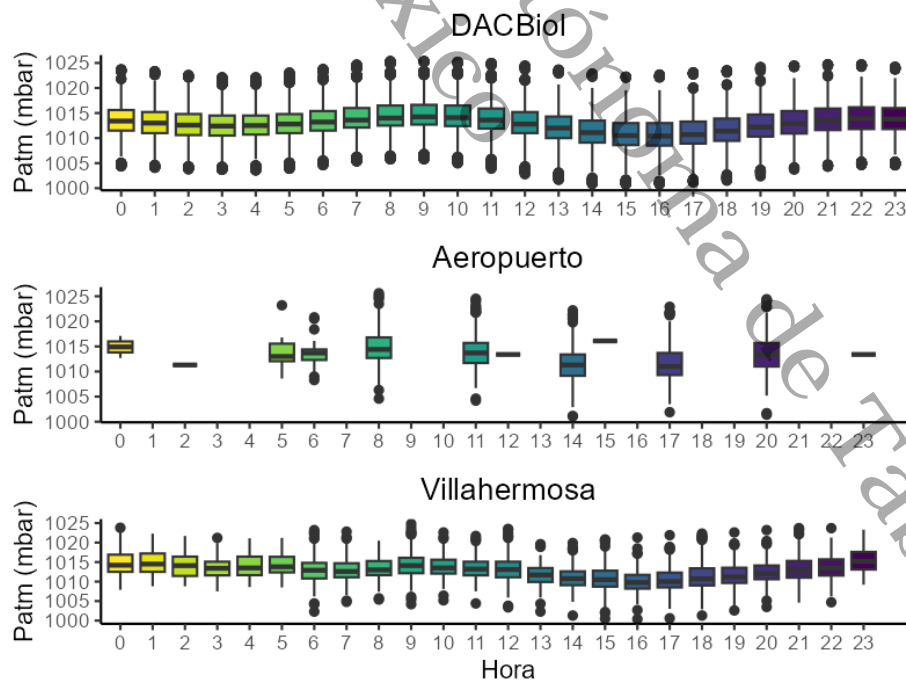
En la Figura 26 se observa la tendencia horaria de la presión para las tres estaciones. En base a la mediana, en la estación DACBIOL la presión mínima fue de 1010 mbar a las 4 p.m. con una máxima de 1014 de 7 a 9 a.m. y de 9 a 11 p.m. En la estación aeropuerto la presión

mínima fue de 1011 mbar a las 2 a.m., 2 p.m. y 5 p.m. el máximo se presentó a las 3 p.m. con un valor de 1016 mbar. En la estación Villahermosa las mínimas se presentó a las 4 y 5 p.m. con un valor de 1010 mbar y las máximas a las 11 p.m. y 1 a.m. con valores de 1015 mbar. Se desconocen las razones exactas por las cuales en la estación aeropuerto no tuvo datos registrados en diferentes horas, algunas posibles causas serian fallas técnicas, problemas de comunicación, la falta de mantenimiento, condiciones meteorológicas o intervenciones externas.

En lo que respecta a DACBIOL la diferencia entre su presión mínima y la de las otras dos estaciones fue de solo 1 mbar y la diferencia entre su presión máxima fue a lo más de 2 mbar. Esta variación de la presión entre estaciones de monitoreo tiene sentido. Si se considera al aire un gas ideal, de acuerdo a la ecuación de estado, la presión depende de la temperatura. Si la temperatura varía - de hecho, varía con la hora del día- la presión varía un poco, aunque la altitud no cambie.

**Figura 26**

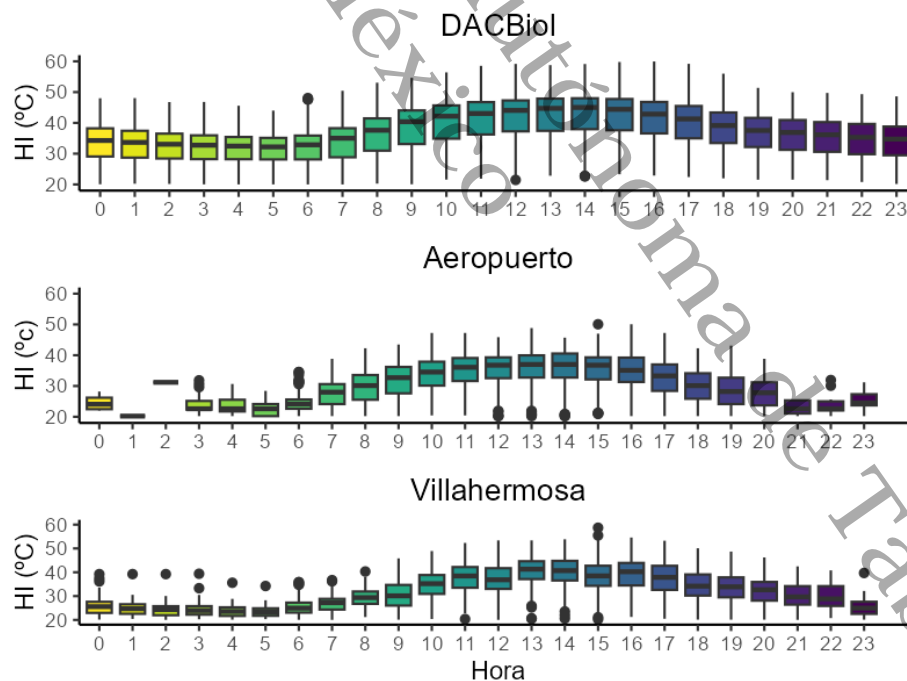
*Tendencia horaria de la presión barométrica en 2023*



La Figura 27 muestra el comportamiento de la tendencia horaria del índice de calor para las tres estaciones. Seguro notará que es algo parecido al de la temperatura pues se calcula en función de esta, pero adiciona la humedad relativa. Y eso pudiera generar pequeñas diferencias en la tendencia. El índice de calor mínimo fue a las 5 a.m. en las tres estaciones, con un valor de 32.1 °C en la estación DACBIOL y 23.1 °C en la estación de Villahermosa. En la estación aeropuerto la mínima se presentó a la 1 y 5 a.m. con un valor de 20.2 °C. En cambio, el máximo del índice de calor fue a las 2 p.m. para la estación DACBIOL con un valor de 45 °C. En la estación aeropuerto la máxima se presentó a las 1 y 2 p.m. con un valor de 37 °C. En la estación de Villahermosa el máximo de índice de calor fue a la 1 p.m. con un valor de 41.3 °C. De acuerdo a la carta de índice de calor, la tendencia en DACBIOL fue de “Precaución” a las 5 a.m. pues la temperatura mediana estuvo en el intervalo de 27 a 32 °C y de “Peligro” a las 2 p.m. pues la mediana estuvo en el intervalo de 41 a 54 °C.

**Figura 27**

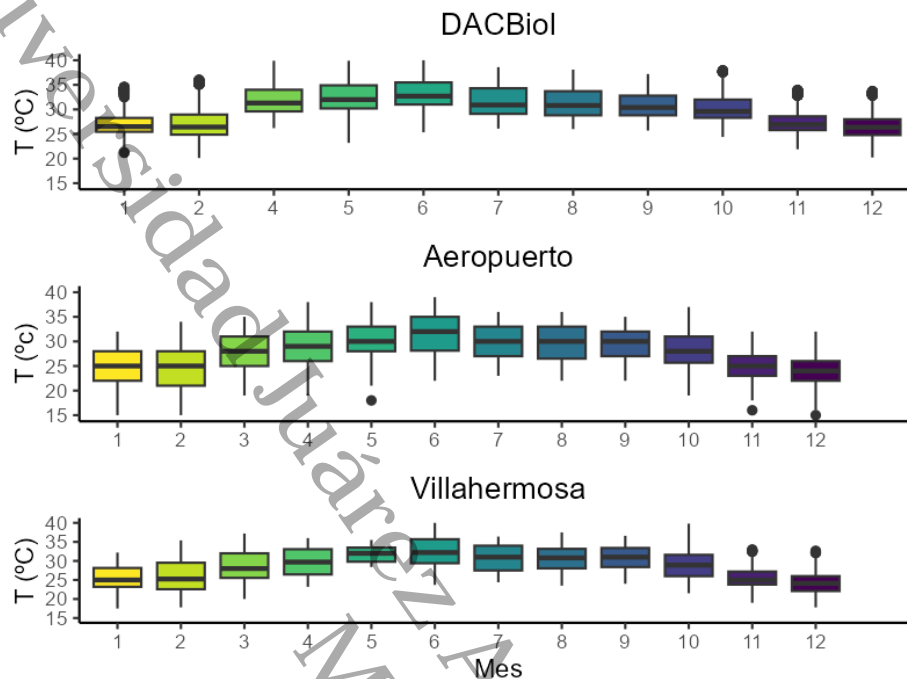
*Tendencia horaria del índice de calor en 2023*



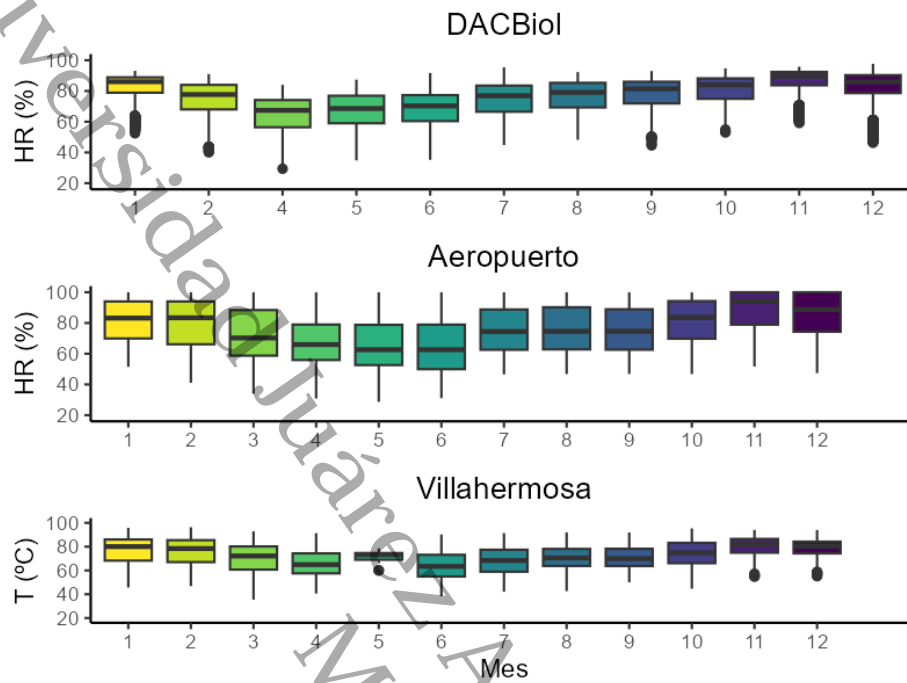
### 9.3. Tendencia Mensual De Los Parámetros

La Figura 28 y 29 muestra el comportamiento de la tendencia mensual de la temperatura y la humedad relativa en la estación DACBIOL de abril de 2023 a febrero de 2024, y durante el 2023 para las estaciones Aeropuerto y Villahermosa. La idea en este caso fue mostrar el comportamiento de 12 meses.

En la Figura 28 se puede observar la tendencia mensual de la temperatura. En DACBIOL la temperatura máxima fue en junio y con un valor mediano de 32.8 °C. Para Aeropuerto y Villahermosa, la máxima también se presentó en junio y fueron de 32.0 °C y 32.2 °C respectivamente. La temperatura mínima en DACBIOL fue de 26.4 °C se presentó en el mes de diciembre igual que en las otras dos estaciones, pero con valores de 24.0 °C y 24.1 °C respectivamente. Por lo tanto, los meses donde la temperatura es máxima y mínima en la DACBIOL son los mismos que en las estaciones de referencia. Esto dice que la estación DACBIOL presentó una tendencia similar a las de estas estaciones. Ahora, de acuerdo a las normales climatológicas 1991-2020 que publica el servicio meteorológico nacional en su sitio web <https://smn.conagua.gob.mx/es/> la tendencia es que el máximo mensual se de en mayo (38.1 °C), el segundo máximo se de en julio (37.2 °C) y hasta junio se presente un tercer máximo (37.1 °C). Con relación a la temperatura mínima mensual, lo esperado es que el primer mínimo se presenta en enero (17.3 °C) y el segundo en febrero y diciembre (18.6 °C). No era esperado que las tendencias mensuales en DACBIOL fuesen iguales a las tendencias de las normales climatológicas aquí consideradas porque solo se analizaron 12 meses de datos. A futuro, cuando la estación DACBIOL cuente con más años de información, será posible comparar su tendencia mensual con la de las normales climatológicas.

**Figura 28***Tendencia mensual de la temperatura en 2023*

En la Figura 29 se muestra la tendencia mensual de la humedad relativa. En DACBIOL el máximo de humedad fue en noviembre con un valor de 89.6 %. En las estaciones Aeropuerto y Villahermosa el máximo también se presentó en noviembre, con valores de 94.1 % y 81.9 % respectivamente. La humedad mínima en DACBIOL fue de 67.4 % y se presentó en el mes de abril mientras que en las dos estaciones de referencia se presentó en junio con valores de 62.6 % y 63.4 % respectivamente. Se puede decir que la estación DACBIOL genera la misma tendencia esperada en el máximo de humedad, pero no en el mínimo. La humedad es una variable fuertemente influenciada por la presencia de vegetación y cuerpos de agua, y este es el caso de la zona donde se ubica la estación DACBIOL, rodeada de vegetación y de un cuerpo de agua artificial. No se comparó la tendencia observada en DACBIOL con las normales climatológicas 1991-2020 que publica el servicio meteorológico nacional en su sitio web porque su análisis no incluye la humedad relativa.

**Figura 29***Tendencia mensual de la humedad en 2023*

#### **9.4. Olas De Calor**

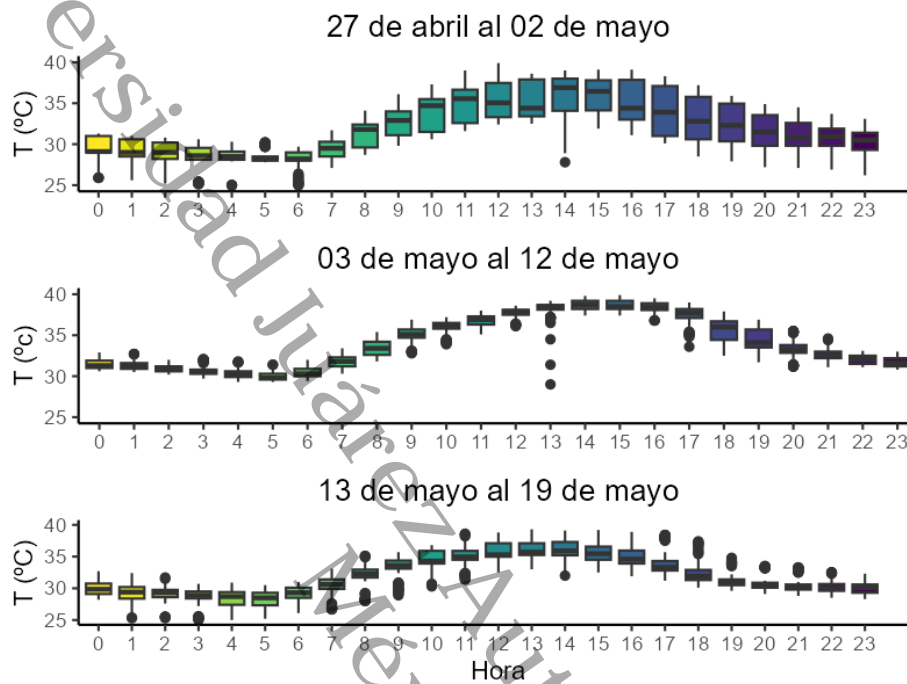
De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), en 2023 se presentaron tres olas de calor: la primera del 01 al 10 de abril, la segunda del 3 al 12 de mayo, y la tercera del 01 al 22 de junio. Al respecto, la Secretaría de Salud presentó un boletín epidemiológico de los daños a la salud por temperaturas extremas registrando un total de 3,169 casos asociados a temperaturas extremas con 6 defunciones en Tabasco (SSA, 2023). Esto indica que es importante monitorear la temperatura cuando suceden estos eventos. Al respecto, se utilizaron los datos generados en la estación DACBIOL para detectar las temperaturas extremas durante las dos últimas semanas de ola de calor; de la primera no se tienen datos.

##### **9.4.1. Segunda Ola De Calor**

La Figura 30 muestra el comportamiento horario de la temperatura del aire durante los días en los que se dio la segunda ola de calor. En ella se observan tres gráficas por cada ola: una semana antes de ola de calor, otra durante la semana de ola de calor y otra más, después de la semana declarada como de ola de calor. La semana previa, la temperatura varió entre 28.1 y 36.9 °C; durante la semana de ola de calor la temperatura varió entre 29.8 y 38.7 °C y la semana posterior entre 28.5 y 35.9 °C. Como puede notarse, durante la semana de ola de calor se registraron temperaturas más altas que en las semanas previa y posterior. De hecho, notará que el efecto todavía permanece la semana siguiente.

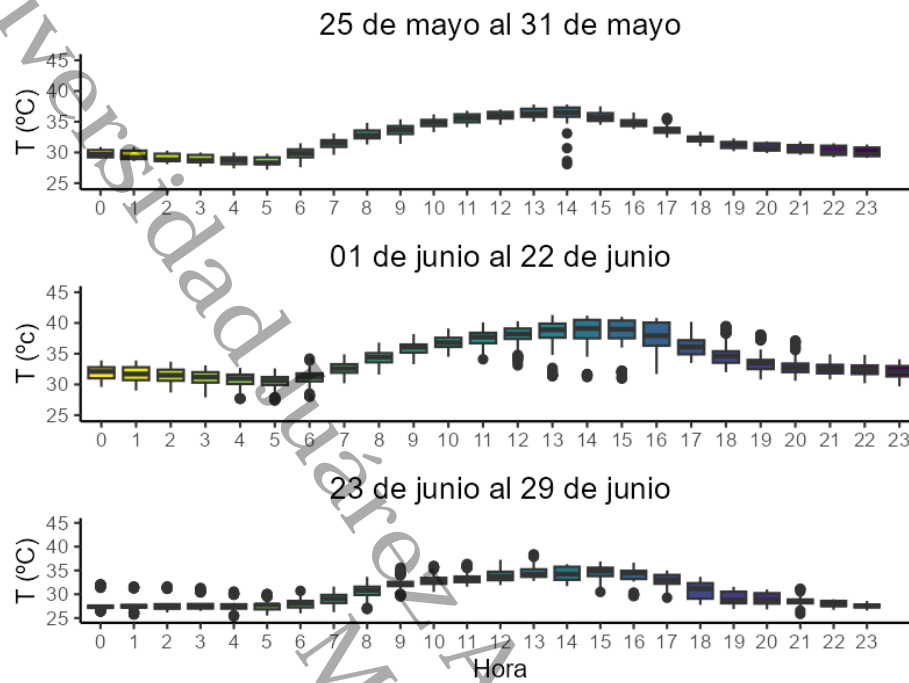
**Figura 30**

*Tendencia horaria durante la segunda ola de calor de 2023*



#### 9.4.2. Tercera Ola De Calor

La Figura 31 muestra el comportamiento horario de la temperatura del aire durante los días declarados como los de la tercera ola de calor. La semana previa, la temperatura varió entre 28.3 y 36.5 °C; durante la semana de ola de calor la temperatura varió entre 30.6 y 39.1 °C y la semana posterior entre 27.3 y 34.9 °C. Como puede notarse, la temperatura mínima y máxima registrada durante la ola de calor son mayores que las de las semanas previa y posterior. Esto es bueno porque indica que el SBC que integra la estación DACBIOL podrá ser útil para monitorear estos eventos y mantener informada a la comunidad universitaria de la DACBIOL.

**Figura 31***Tendencia horaria durante la tercera ola de calor de 2023*

### 9.5. Series De Tiempo

Las Figuras 32 a 35 muestran la serie temporal del promedio diario de la temperatura, humedad relativa, presión atmosférica e índice de calor para la estación DACBIOL de abril a diciembre de 2023. La línea recta que aparece en cada figura representa la tendencia lineal de la serie. En la Tabla 6 se presentan los modelos de regresión lineal que se ajustaron a las series de tiempo univariadas correspondientes. No se presentó el modelo de tendencia del índice de calor, ya que, al obtenerse de la temperatura diaria, su tendencia es semejante. En cada uno de estos modelos  $t$  está en días,  $T$  en °C,  $HR$  en % y  $Patm$  en mbar.

La serie temporal de la temperatura (Figura 32) mostró una tendencia a la disminución a un ritmo de 0.029 °C/d, que es el valor absoluto de la pendiente de la recta de regresión. La serie temporal de la humedad relativa (Figura 33) mostró una tendencia lineal creciente a un ritmo de 0.087 %/d. El valor positivo de la pendiente se interpretó como una tendencia al aumento o crecimiento. La serie temporal de la presión atmosférica (Figura 34) también mostró una tendencia lineal creciente a un ritmo de 0.024 mbar/d. En el caso del índice de calor, la tendencia lineal también fue a la disminución como puede apreciarse por la línea recta ajustada (Figura 35). La Tabla 6 también muestra el coeficiente de determinación del modelo ajustado que es un parámetro que explica el porcentaje de variación en la variable de respuestas (en este caso  $T$ ,  $HR$  y  $Patm$ ) que es explicada por la variable tiempo. Para la temperatura y la humedad, el tiempo  $t$ , explica un poco más del 60 % de la variabilidad observada en estas variables, pero tan solo el 31 % de la variabilidad observada en la presión atmosférica.

**Tabla 6**

*Modelos de tendencia lineal*

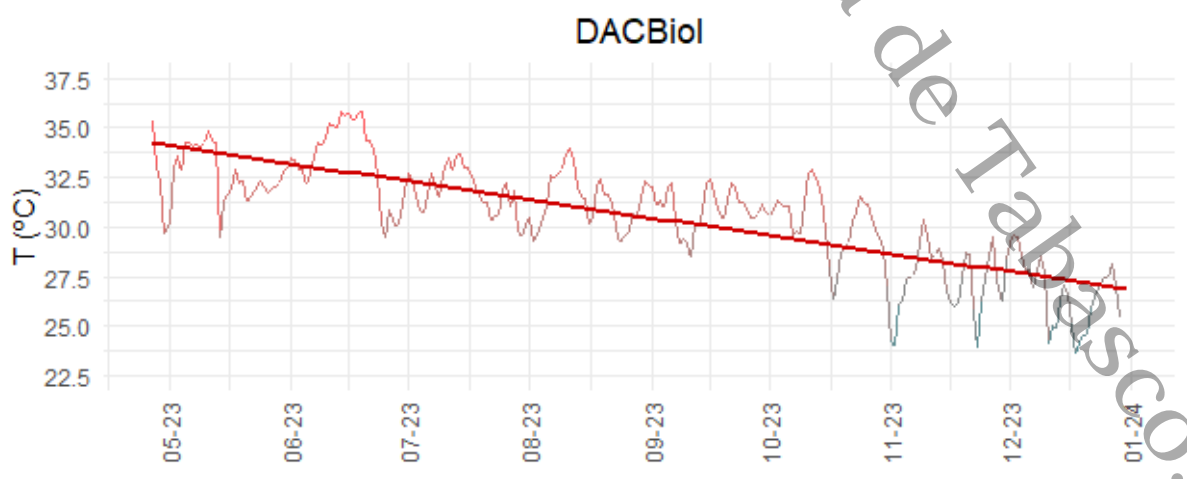
Serie	Modelo de tendencia lineal	R <sup>2</sup>	Tendencia
Temperatura	$T = 34.18 - 0.029t$	0.63	Disminución
Humedad	$HR = 66.20 + 0.087t$	0.61	Crecimiento
Presión Atmosférica	$Patm = 1010.0 + 0.024t$	0.31	Crecimiento

Las series de tiempo univariadas pueden presentar además de tendencia lineal, una componente estacional y una componente cíclica. La presencia de las últimas dos componentes requiere de un análisis diferente de la serie (Bhatta et al., 2020), además de que se requieren datos históricos de varios años. Sin embargo, la tendencia lineal es de las más fáciles de modelar mediante métodos de regresión lineal simple. Un modelo de tendencia lineal es útil para determinar si la serie tiende a mantenerse estable, es decir, si los valores no cambian mucho con el tiempo; tiende a aumentar o disminuir, en cuyo caso lo común es determinar la tasa de aumento o disminución como la pendiente de la recta de regresión. Si la pendiente es positiva, la tendencia se clasifica como creciente y decreciente si es negativa.

Una vez que se tiene un modelo de tendencia, se remueve de la serie y el estudio se concentra en obtener modelos para la serie de tiempo residual como lo es el modelo de comportamiento que se presenta y repite con las estaciones del año o la época del año o cada década, etcétera. Hasta hace poco, realizar este tipo de análisis no era posible pues no se contaba con información local, pero gracias al desarrollo de la estación DACBIOL con SBC será posible seguir no solo estudiando la tendencia sino detectar la presencia de componentes adicionales como los ya mencionados y a partir de ello crear modelos de pronóstico como los de redes neuronales artificiales, lógica difusa y redes bayesianas, por ejemplo (Das & Ghosh, 2018).

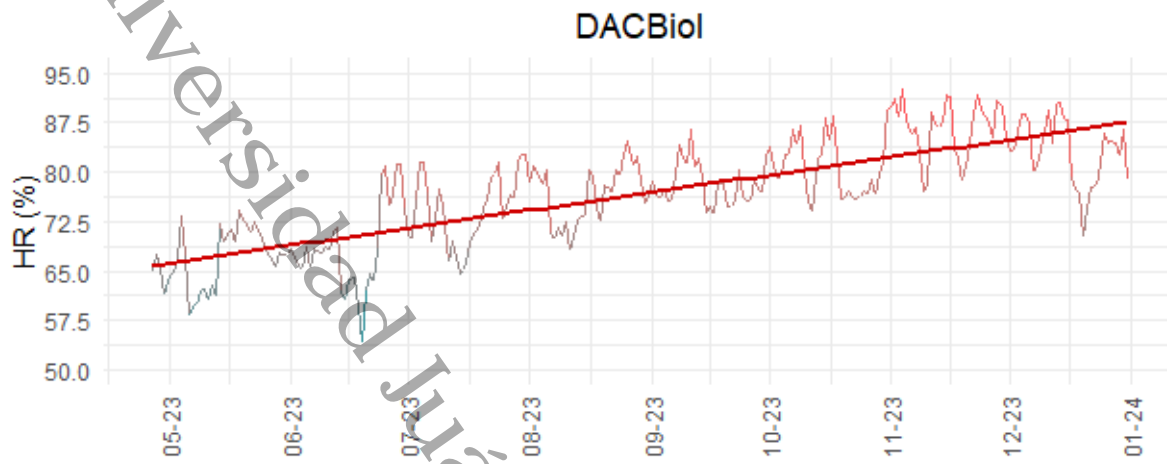
### Figura 32

*Serie de tiempo de la temperatura por día*

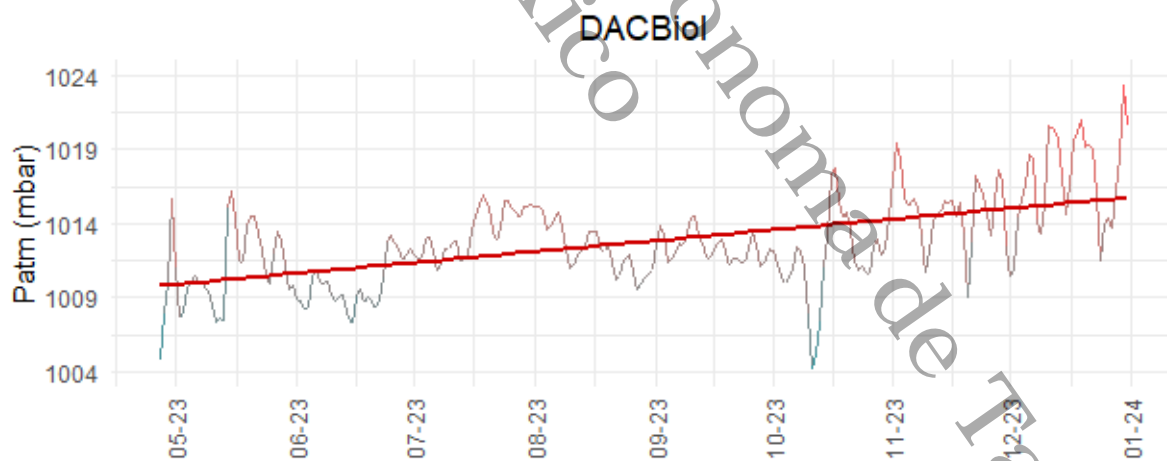


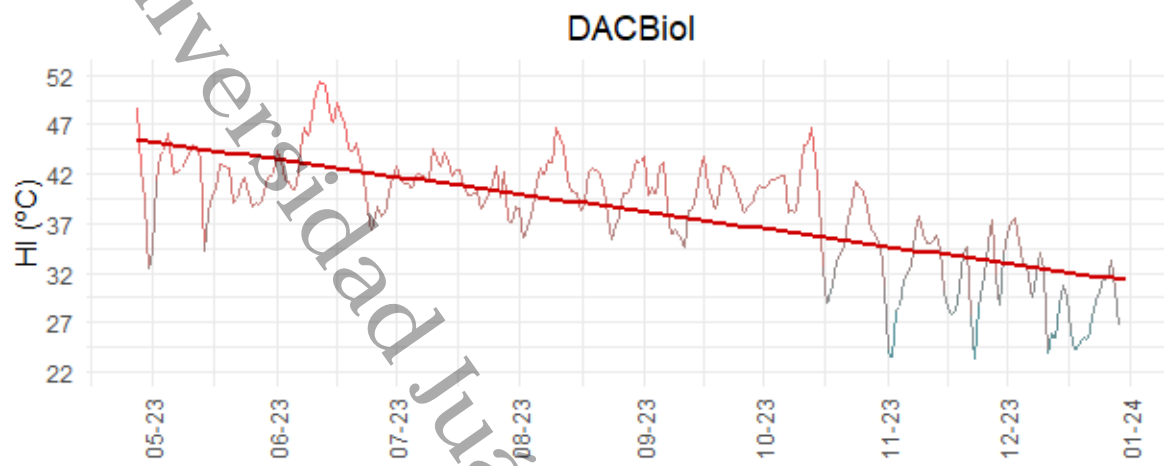
**Figura 33**

Serie de tiempo de la humedad por día

**Figura 34**

Serie de tiempo de la presión por día



**Figura 35***Serie de tiempo del índice de calor*

## 10. Conclusiones

En conclusión, durante el estudio se logró analizar el comportamiento de los parámetros ambientales antes mencionados con SBC. El desarrollo de un prototipo con SBC permitió la medición de parámetros ambientales con el fin de medir el aire ambiente, demostrando que el sensor es capaz de realizar mediciones y que posee una estabilidad a largo plazo. Durante el desarrollo del equipo, se logró generar una base de datos detallada para cada parámetro ambiental, registrando y promediando cada medición en un archivo de Excel mediante el uso del Shield Datalogger. Esta base de datos resultó ser útil para la creación de modelos de tendencia lineal, así como de modelos horarios y mensuales.

A partir de la recopilación de estos datos, se consiguió estudiar el comportamiento de los parámetros ambientales en la división académica ya que permitió la manipulación y elaboración de gráficos mediante el software jamovi con el que podemos ver el comportamiento del ambiente con los datos que obtenemos de la estación y compararlo con las estaciones que se usan en la región. Al comparar los datos de la estación con los de las estaciones de referencia, observamos una gran similitud, sin diferencias significativas, manteniendo la congruencia y fiabilidad de nuestros datos.

La aplicación de la estación DACBIOL esta alineada según las directrices de la Secretaría de Salud (SSA) debido a que el cálculo del índice de calor nos permite un monitoreo efectivo, la creación de sistemas de alerta temprana en la división, y la planificación y respuesta ante eventos de calor extremo, contribuyendo significativamente a la salud pública y la prevención de enfermedades relacionadas con el calor.

Como resultado de este análisis la temperatura, humedad y presión promedio en DACBIOL representativos durante el periodo abril de 2023 a febrero de 2024 fue de 29.7 °C, 79.9 % y 1013 mbar respectivamente.

La temperatura horaria en DACBIOL tendió a ser máxima a las 2 p.m. y mínima las 5 a.m. con valores de 34.2 °C y 27.7 °C respectivamente. La humedad relativa tendió a ser máxima las 3 p.m. y mínima a las 5 a.m. con valores de 87.5 % y 64.1 %, respectivamente. La presión atmosférica fue mínima a las 4 pm y máxima entre las 7 y 9 de la mañana y 9 y 11 de la noche.

La temperatura mensual tendió a su máximo en junio y su mínimo en diciembre con valores de 32.8 °C y 26.4 °C respectivamente. La humedad mensual fue máxima en noviembre y mínima en abril con valores de 89.6 % y 67.4 % respectivamente.

De acuerdo a la carta de índice de calor, la tendencia en DACBIOL fue de "Precaución" a las 5 a.m. pues la temperatura mediana estuvo en el intervalo de 27 a 32 °C y de "Peligro" a las 2 p.m. pues la mediana estuvo en el intervalo de 41 a 54 °C. Durante la segunda ola de calor de 2023 el SBC de la estación DACBIOL registro un intervalo de temperaturas de 29.8 a 38.7 °C y durante la tercera ola de calor un intervalo de la temperatura entre 30.6 y 39.1 °C

La serie de tiempo de la temperatura diaria presentó una tendencia lineal a la disminución de la temperatura a una tasa de 0.029 °C/d; mientras que las correspondientes a la humedad y la presión presentaron una tendencia lineal creciente a una tasa respectiva de 0.087 %/d y 0.024 mbar/d, respectivamente.

## Perspectivas

Tras el desarrollo del sensor BME680, se pudo concluir que este dispositivo es eficaz y fiable para investigaciones relacionadas con la calidad del aire, debido a que es una herramienta que ofrece datos precisos y consistentes. Durante la medición de los parámetros ambientales, no se observaron datos fuera del intervalo establecido, lo que indica una alta reproducibilidad en los datos y demuestra que este dispositivo es capaz de evaluar el aire ambiente. Este dispositivo ofrece una buena relación calidad – precio frente a otras tecnologías en el mercado. Si bien existen opciones de mayor precisión y características más avanzadas, este sensor se posiciona como una alternativa viable para aquellas instituciones que no pueden costear una estación de alto costo. El BME680 destaca por su versatilidad, dado que puede ser implementado en una amplia gama de proyectos desde aplicaciones IoT, estaciones meteorológicas y dispositivos de monitoreo ambiental. Su capacidad de proporcionar datos precisos y consistentes lo hace ideal para el desarrollo de estaciones de monitoreo más complejas, donde se requieran múltiples sensores y la medición de diversos parámetros.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

## 11. Referencias

- Adafruit Industries. (2021). *DHT11, DHT22 and AM2302 Sensors*. <https://adafru.it/uF2>
- Adafruit Industries. (2024). *Adafruit Data Logger Shield*. <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield>
- Anderson, G. B., Bell, M. L., & Peng, R. D. (2013). Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research. *Environmental Health Perspectives*, 121(10), 1111–1119. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206273>
- Arduino. (2018, February 5). *What is Arduino?* <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Bhatta, S. R., Adhikari, P., & Byanjankar, R. (2020). Choice of Regression Models in Time Series Data. *Economic Journal of Development Issues*, 29 & 30(1–2), 101–129. <https://doi.org/10.3126/ejdi.v30i1-2.46058>
- Bolaina, A. (2020). *Monitoreo de parámetros ambientales en espacios de la división académica de ciencias biológicas con sensores de bajo costo*. UJAT.
- Bosch Sensortec. (2019). *BME680 Datasheet*.
- Bosch Sensortec. (2024). *Gas sensor BME680*. <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/#references>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2013). *Termodinámica* (McGraw Hill México, Ed.; 7th ed.).
- Das, M., & Ghosh, S. K. (2018). Data-driven approaches for meteorological time series prediction: A comparative study of the state-of-the-art computational intelligence techniques. *Pattern Recognition Letters*, 105, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.08.009>
- García, G., & Rico, K. G. (2019). Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire. *CTS Epsitemus*, 31–32. [www.epistemus.uson.mx](http://www.epistemus.uson.mx)
- Itead Studio. (2010). *HC-05*.
- Javaid, M., Haleem, A., Rab, S., Pratap Singh, R., & Suman, R. (2021). Sensors for daily life: A review. *Sensors International*, 2, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100121>

- Jose, J., & Sasipraba, T. (2019). Indoor air quality monitors using IOT sensors and LPWAN. *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 633–637. <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2019.8862647>
- Koestoer, R. A., Pancasaputra, N., Roihan, I., & Harinaldi. (2019). A simple calibration methods of relative humidity sensor DHT22 for tropical climates based on Arduino data acquisition system. *AIP Conference Proceedings*, 2062, 020009. <https://doi.org/10.1063/1.5086556>
- Opitz-Stapleton, S., Sabbag, L., Hawley, K., Tran, P., Hoang, L., & Nguyen, P. H. (2016). Heat index trends and climate change implications for occupational heat exposure in Da Nang, Vietnam. *Climate Services*, 2–3, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.08.001>
- Rico, K. G. (2018). *Sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, Sonora*. Universidad de Sonora.
- SSA. (2023). *Temperaturas naturales extremas (Temporada de calor 2023)*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/845222/TNE\\_2023\\_SE29.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/845222/TNE_2023_SE29.pdf)
- TEXAS INSTRUMENTS. (2017). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. [www.ti.com](http://www.ti.com)
- Wall, D., McCullagh, P., Cleland, I., & Bond, R. (2021). Development of an Internet of Things solution to monitor and analyse indoor air quality. *Internet of Things (Netherlands)*, 14, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100392>
- Willett, H. C., & Sanders, F. (1959). The Composition and the Vertical Extent of the Atmosphere. In *Descriptive Meteorology* (2nd ed., pp. 1–13). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3165-5.50005-5>
- Williams, R. (2014). *Findings from the 2013 EPA Air Sensors Workshop*.

## Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

<b>Título de Tesis:</b>	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS BÁSICOS DEL AIRE AMBIENTE EXTERIOR MEDIDOS CON SENSORES DE BAJO COSTO
<b>Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:</b>	RICARDO RAMOS PÉREZ
<b>ORCID:</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0000-3257-8411">https://orcid.org/0009-0000-3257-8411</a>
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>Los Sensores De Bajo Costo (SBC) son dispositivos que se utilizan para medir y monitorear diversas variables ambientales, físicas, químicas o biológicas a un bajo costo en comparación con los sensores tradicionales. Estos sensores son populares debido a su accesibilidad y capacidad para ser implementados en una variedad de aplicaciones, especialmente en proyectos de bajo presupuesto o en áreas donde se requiere una gran cantidad de sensores. El avance tecnológico ha permitido que estos sensores sean fáciles de adquirir y de mantener en comparación a las estaciones meteorológicas actuales, sin embargo, aún se enfrentan a desafíos en la estandarización y validación de datos.</p> <p>Este estudio explora el uso de hardware libre, específicamente la placa microcontroladora Arduino UNO, en combinación con el sensor BME680 de Bosch, que mide temperatura, humedad y presión atmosférica. Además, se utilizó el Shield Data Logger para el almacenamiento de datos y un módulo HC-05 para la comunicación Bluetooth. El software Arduino IDE y Jamovi se emplearon para la programación y análisis de datos.</p> <p>El estudio se llevó a cabo en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la</p>

	<p>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, donde se desarrolló un dispositivo prototipo que operó durante 12 meses, tomando lecturas cada tres minutos. Los resultados mostraron que este dispositivo se posiciona como una alternativa viable para instituciones con presupuestos limitados. Su versatilidad lo hace ideal para proyectos IoT (Internet of Things), estaciones meteorológicas, dispositivos de monitoreo ambiental y proyectos involucrados en el análisis de la calidad de aire.</p>
<p><b>Palabras claves de la Tesis:</b></p>	<p>Arduino, BME680, Estación, HC-05, SBC.</p>
<p><b>Referencias citadas:</b></p>	<p>Anderson, G. B., Bell, M. L., &amp; Peng, R. D. (2013). Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research. <i>Environmental Health Perspectives</i>, 121(10), 1111–1119. <a href="https://doi.org/10.1289/ehp.1206273">https://doi.org/10.1289/ehp.1206273</a></p> <p>Bhatta, S. R., Adhikari, P., &amp; Byanjankar, R. (2020). Choice of Regression Models in Time Series Data. <i>Economic Journal of Development Issues</i>, 29 &amp; 30(1–2), 101–129. <a href="https://doi.org/10.3126/ejdi.v30i1-2.46058">https://doi.org/10.3126/ejdi.v30i1-2.46058</a></p> <p>Bolaina, A. (2020). Monitoreo de parámetros ambientales en espacios de la división académica de ciencias biológicas con sensores de bajo costo. <i>UJAT</i></p> <p>García, G., &amp; Rico, K. G. (2019). Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire. <i>CTS Epsitemus</i>, 31–32. <a href="http://www.epistemus.uson.mx">www.epistemus.uson.mx</a></p> <p>SSA. (2023). Temperaturas naturales extremas (Temporada de calor 2023). <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/845222/TNE_2023_SE29.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/845222/TNE_2023_SE29.pdf</a></p> <p>Wall, D., McCullagh, P., Cleland, I., &amp; Bond, R. (2021). Development of an Internet of Things solution to monitor and analyse indoor air quality. <i>Internet of Things (Netherlands)</i>, 14, 1–3. <a href="https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100392">https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100392</a></p>