



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO
MAESTRIA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**



FACULTAD DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE MONITOREO DE LA CANTIDAD
Y CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA EN LA CIUDAD DE
MORELIA**

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

ING. LUIS DANIEL MEJÍA FERREYRA

DIRECTORA:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

CO-DIRECTOR:

DR. JOSÉ APOLINAR CORTÉS

MORELIA MICHOACÁN, ENERO, 2023

RESUMEN

El monitoreo de la calidad del agua se realiza por varias razones, ya sea para determinar si el agua es apta para uso y consumo humano, para fines agrícolas o simplemente para determinar el grado de contaminación de un cuerpo de agua, pero los métodos tradicionales para determinar la calidad del agua pueden llevar mucho tiempo y suelen ser costosos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un Sistema de Monitoreo de la Cantidad y Calidad del Agua de Lluvia en la ciudad de Morelia, donde se le proporcionará información de la calidad y la cantidad del agua a la población además de que se proporcionará una plataforma para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) que estén interesadas en instalar un SCALL para aquellas personas que no poseen los conocimientos técnicos.

La metodología consiste en diseñar y desarrollar una estación de monitoreo en tiempo real, elaborada con sensores de bajo costo y la plataforma de Arduino, en un entorno del internet de las cosas (IoT), que pueda monitorear la cantidad y la calidad del agua de lluvia. Además de desarrollar una plataforma web en la que se pueda visualizar la información de forma espacial y temporal.

Palabras clave: Arduino, Internet de las cosas, sensores de bajo costo, tiempo real, base de datos.

ABSTRACT

Water quality monitoring is done for various reasons, either to determinate if the water is suitable for human use and consumption, for agricultural purposes, or simply to determine the degree of contamination of a body of water, but traditional methods to determinate water quality can be time consuming and expensive.

The objective of this work is to develop a Rainwater Quantity and Quality Monitoring System in the city of Morelia, which will provide information on the quality and quantity of water to the population in addition to providing a platform for the design of rainwater harvesting systems (SCALL) that are interested in installing a SCALL for those who do not have the technical knowledge.

The methodology consists of designing and developing a real-time monitoring station, elaborated with low-cost sensors and the Arduino platform, in an Internet of Things (IoT) environment, that can monitor the quantity and quality of rainwater. In addition to developing a web platform where the information can be visualized spatially and temporally.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, José y Leticia, por estar conmigo y ayudarme a llegar hasta aquí; a mis hermanos Andrea, Wendy y Raúl porque pese a todo sé que cuento con ustedes. A mis amigos, Vanessa, Elvis, Cristofer, Alan, Diana Enríquez, Karla Ilda, Karla Valeria, Ángel Flores, Diana Laura y Denise, de quienes he recibido apoyo y siempre desean lo mejor para mí, así como yo a ustedes.

A mis compañeros de generación en la maestría, Juan Ángel y Julio que hicieron más ameno el camino.

AGRADECIMIENTOS

Un amplio agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico para el diseño del proyecto.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en especial al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, que me dieron la oportunidad de formar parte de ellas.

A los doctores Sonia Tatiana Sánchez Quispe, José Apolinar Cortés y Liliana García Romero por su invaluable asesoramiento en este trabajo de investigación.

A mis sinodales Marco Antonio Martínez Cinco, Julio Cesar Orantes Avalos y Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por sus observaciones y comentarios en cada evaluación que ayudaron a mejorar este trabajo de investigación.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. CICLO DEL AGUA	10
2.1.1. LA PRECIPITACIÓN	11
2.2. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL MUNDO	11
2.2.1. SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	12
2.2.2. SITUACIÓN DEL AGUA EN MICHOACÁN	13
2.2.3. SITUACIÓN DEL AGUA EN MORELIA	15
2.3. ANÁLISIS DE AGUA	16
2.4. NORMATIVIDAD	18
2.4.1. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021	18
2.4.2. NORMAS MEXICANAS	18
2.5. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	19
2.5.1. QUÍMICA DE LA LLUVIA ÁCIDA	21
2.6. SISTEMAS DE MONITOREO	22
2.6.1. TÉRMINOS UTILIZADOS EN SCADA	23
2.6.2. COMPONENTES ELECTRÓNICOS	25
2.6.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	25
2.7. INSTRUMENTACIÓN	26
2.7.1. ARDUINO	26
2.7.2. NODEMCU	27
2.7.3. INTERNET OF THINGS (IoT)	28
2.7.4. THINGSPEAK	28
2.7.5. BASE DE DATOS.....	29
2.7.6. MYSQL	29
2.8. DISEÑO	29
2.9. CALIBRACIÓN.....	31
3. ANTECEDENTES	32
3.1. CRISIS DE AGUA	32
3.2. APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA	32
3.3. CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA	34
3.3. EQUIPOS DE MONITOREO	35
3.3. INFRAESTRUCTURA DEL MONITOREO DE VARIABLES METEOROLÓGICAS DE MORELIA	37
4. JUSTIFICACIÓN.....	40
5. HIPÓTESIS.....	41

6. OBJETIVO	41
6.1. OBJETIVO GENERAL	41
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
7. METODOLOGÍA	42
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	47
8.1. ANÁLISIS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS DE BAJO COSTO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA	47
8.2. SELECCIÓN DE SENSORES PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA	49
8.3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA	51
8.3.1. ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO.....	51
8.3.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	51
8.3.3. CALIBRACIÓN DEL PROTOTIPO	54
8.3.4. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	61
8.4. CONSTRUCCIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA (EMCAL)	65
8.5. IDENTIFICACIÓN DE LUGARES DONDE INSTALAR EMCAL	65
8.6. INSTALACIÓN DE EMCAL.....	66
8.7. DESARROLLO DE PLATAFORMA PARA VISUALIZAR DATOS DE FORMA ESPACIAL Y TEMPORAL	68
8.7.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DE LA PLATAFORMA	68
8.7.2. DISEÑO DE LA PLATAFORMA	68
8.7.3. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLATAFORMA	71
8.7.4. PUBLICACIÓN DEL SITIO WEB	71
9. CONCLUSIONES	73
10. RECOMENDACIONES	73
11. REFERENCIAS	75
ANEXOS	85
ANEXO 1. FICHAS TÉCNICAS DE LOS SENSORES EMPLEADOS	85
A1.1. SENSOR DE PH	85
A1.2. SENSOR DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	86
A1.3. SENSOR DE TURBIDEZ.....	89
A1.4. SENSOR DE TEMPERATURA.....	90
A1.5. SENSOR DE PRECIPITACIÓN	91
ANEXO 2. DIAGRAMA DE CONEXIONES	93
ANEXO 3. COSTO TOTAL EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del agua (USGS, 2019).....	10
Figura 2. ¿Cuánta agua hay en el mundo?, (Ágora, 2022).	12
Figura 3. Balance de agua en México, 2017 (SNIARN, 2022).	12
Figura 4. Precipitación media normal en México, 2000-2017 (SNIARN, 2022).....	13
Figura 5. Consumo anual de agua en la ciudad de Morelia (IMPLAN Morelia, 2022).	15
Figura 6. Precipitación promedio mensual (IMPLAN Morelia, 2022).....	16
Figura 7. Placa de desarrollo Arduino NANO (Steren, 2021).	27
Figura 8. Placa de desarrollo NodeMCU (ESP8266) (Steren, 2021)	28
Figura 9. Metodología para el desarrollo del proyecto.....	42
Figura 10. Estaciones meteorológicas automáticas de bajo costo del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) 2022, elaboración propia.....	47
Figura 11. Pluviómetro de balancín WH-SP-RG MISOL de las estaciones del SAIH.	48
Figura 12. Sensor DHT22 de las estaciones del SAIH.	48
Figura 13. Modelo 3D de los elementos del pluviómetro de cubetas basculantes.	48
Figura 14. PCB Pluviómetro de bajo costo.	49
Figura 15. Ubicación de los puntos de muestreo, elaboración propia.	50
Figura 16. PCB diseñada para montar el microcontrolador y los sensores.....	52
Figura 17. Arquitectura del prototipo de monitoreo de la calidad del agua de lluvia, elaboración propia.....	52
Figura 18. Modelo 3D donde se integran los circuitos y los sensores de calidad del agua de lluvia.....	53
Figura 19. Uso de la impresora Ender 3 Pro para la impresión 3D de la carcasa que integra los circuitos.	54
Figura 20. Modelo 3D donde se integran los circuitos de los sensores de calidad del agua de lluvia.....	54
Figura 21. Relación entre el voltaje y el pH con recta de mejor ajuste.....	56
Figura 22. Soluciones buffer de pH 4, 7 y 10, empleadas para la calibración del sensor de pH, elaboración propia.....	56
Figura 23. Relación entre el voltaje y la CE, empleando la Ecuación 5.	58
Figura 24. Calibración del sensor de SDT, elaboración propia.	58
Figura 25. Relación entre el voltaje y la turbidez, empleando la Ecuación 9.....	60
Figura 26. Diluciones de 5, 10, 20 y 50 NTU, preparadas para la calibración del sensor de turbidez.....	60
Figura 27. Localización de las estaciones de monitoreo de calidad del agua de lluvia.....	66
Figura 28. Estación meteorológica del SAIH al que se le integraron sensores para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia.....	67
Figura 29. Sensores de calidad del agua de lluvia.	67
Figura 30. Desarrollo de la base de datos.	68
Figura 31. Interfaz de usuario de la plantilla gratuita SB Admin 2.	68

Figura 32. Interfaz web desarrollada de manera local.	69
Figura 33. Interfaz para la selección de parámetros a consultar y la fecha de cuando se quiere consultar información.	70
Figura 34. Ventana emergente para la selección de datos y acotación de fechas para exportar en formato csv.	70
Figura 35. Plataforma para el diseño de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) Aqua Pluvia.	70
Figura 36. Formato de salida descargable.	71
Figura 37. Sitio web en funcionamiento.	72
Figura 38. Grafica de temperatura en tiempo real vista desde la plataforma.	72
Figura 39. Sensor de pH analógico modelo PH-4502C (DFRobot, 2021).	86
Figura 40. Sensor analógico de SDT SKU SEN0244 (DFRobot, 2021).	89
Figura 41. Sensor de turbidez analógico SKU: SEN0189 (DFRobot, 2021).	90
Figura 42. Sensor de temperatura DS18B20 digital (Industrial Shields, 2021).	91
Figura 43. Sensor de precipitación WH-SP-RG.	92
Figura 44. Diagrama de conexiones, elaboración propia.	93

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Error relativo (%).	31
Ecuación 2. Relación entre volumen captado y área de captación para obtener la lámina de precipitación.	55
Ecuación 3. Ecuación que determina el pH en función del voltaje.	56
Ecuación 4. Ecuación general para convertir voltaje a un valor de pH.	85
Ecuación 5. Ecuación para convertir el valor de voltaje a conductividad eléctrica en micro-Siemens/cm.	87
Ecuación 6. Ecuación que correlaciona la conductividad eléctrica con los sólidos disueltos totales.	87
Ecuación 7. Compensación por temperatura del valor del voltaje.	87
Ecuación 8. Simplificación de la compensación del voltaje por temperatura.	88
Ecuación 9. Ecuación para convertir el valor del voltaje en turbidez, en NTU.	89

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la calidad del agua se realiza para diversos fines, desde determinar si el agua es apta para beber o para fines agrícolas. Los métodos habituales para determinar la calidad del agua son tardados y costosos. Con ese método de análisis del agua, no es posible determinar la calidad del agua cuando se necesita, además de que no siempre se lleva un registro de las variaciones de los parámetros a lo largo del tiempo.

Con la aparición de equipos de bajo costo que pueden realizar esta tarea de manera sencilla y sin muchos recursos, se nos ha dado la posibilidad de poder monitorear de manera remota, sin tener acceso físico al medio, y con ello, reducir los costos de inspección y control, por lo que es necesario conocer las aplicaciones, características y limitaciones que pueden tener estos dispositivos.

El uso de un dispositivo de este tipo tendría múltiples ventajas sobre el enfoque habitual de medición de la calidad del agua, se podrían hacer mediciones instantáneamente, de forma continua y los interesados de aprovechar el agua de lluvia podrían obtener las mediciones de la calidad en tiempo real; sin depender de un laboratorio.

Una desventaja de usar un equipo de sensores de bajo costo es que se pueden medir menos parámetros de agua y estas medidas son menos precisas, pero con una calibración adecuada se puede reducir el error en la precisión (Oelen, van Aart, & de Boer, 2018).

En este trabajo se desarrollaron estaciones de monitoreo de la cantidad y calidad del agua de lluvia para la ciudad de Morelia, mediante el uso de tecnología de bajo costo con hardware y software libre, la información de estas estaciones de monitoreo se puede visualizar en tiempo real de forma espacial y temporal en una plataforma web, donde además se ofrece una herramienta para el diseño de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia para la población que no posee los conocimientos técnicos y está interesada en la captación de agua de lluvia como fuente alternativa al suministro de red de agua potable.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ciclo del agua

El ciclo del agua no se inicia en un lugar específico, pero para esta explicación asumimos que comienza en los océanos. El sol, que dirige el ciclo del agua, calienta el agua de los océanos, la cual se evapora hacia el aire como vapor de agua. Corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde la menor temperatura causa que el vapor de agua se condense y forme las nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes sobre el globo, las partículas de nube colisionan, crecen y caen en forma de precipitación si la atmósfera es cálida, en cambio si la atmósfera es fría, el agua cae en forma de nieve o granizo.

Parte del agua que llega a la tierra es aprovechada por los seres vivos, mientras que otra parte escurre por el terreno hasta llegar a algún cuerpo de agua (río, lago, océano); fenómeno conocido como escurrimiento. No toda el agua de lluvia fluye en forma de escurrimiento, una gran parte del agua es absorbida por el suelo como infiltración. Parte de esta agua permanece en las capas superiores del suelo, y vuelve a los cuerpos de agua como descarga de agua subterránea. Otra parte del agua subterránea encuentra aperturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales de agua dulce. El agua subterránea que se encuentra a poca profundidad es absorbida por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas regresando a la atmósfera. Otra parte del agua infiltrada alcanza las capas más profundas de suelo y recarga los acuíferos (roca subsuperficial saturada), los cuales almacenan grandes cantidades de agua dulce por largos periodos de tiempo. A lo largo del tiempo, esta agua continúa moviéndose, parte de ella retorna a los océanos, donde el ciclo del agua se “cierra” y comienza nuevamente, en la *Figura 1*, se ilustra el ciclo del agua (USGS, 2019).



Figura 1. Ciclo del agua (USGS, 2019).

2.1.1. La precipitación

La precipitación, es agua liberada desde las nubes en forma de lluvia, nieve o granizo. Es el principal proceso por el cual el agua retorna a la Tierra. Es el factor principal que controla la hidrología de una región (USGS, 2019).

La precipitación contribuye a mantener el balance atmosférico. Sin precipitaciones, todo el planeta sería un desierto. Las precipitaciones ayudan a la flora, la agricultura y nos proporcionan de agua para beber. Por otro lado, las precipitaciones también pueden llegar a ser dañinas. Demasiada lluvia puede provocar inundaciones severas, así como daños en zonas rurales y urbanas.

De acuerdo a la definición oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la lluvia es la precipitación de gotas de agua líquida en forma de gotas de diámetro mayor a 0.5 mm, o más pequeñas, pero muy dispersas (SMN, 2022). La lluvia depende de tres factores: presión atmosférica, temperatura y radiación solar.

La precipitación se mide por la altura que el agua caída alcanza sobre una superficie plana y horizontal, en la que no existieran pérdidas por infiltración y evaporación; tal altura se mide en milímetros (mm). La medición de la precipitación se realiza empleando pluviómetros o pluviógrafos.

El pluviómetro proporciona la altura de precipitación total en milímetros en intervalos de tiempo fijados, generalmente son de 24 horas.

El pluviógrafo: mide continuamente la precipitación en el tiempo, es el mismo pluviómetro provisto de un mecanismo que le permite marcar en un tipo especial de papel la variación de la precipitación con el tiempo.

2.2. Distribución del agua en el mundo

Estudios acerca del agua en todo el planeta han revelado que el 97.5% pertenece al mar. El 2.5% restante es agua dulce, de la cual el 69.7% se encuentra en los polos en forma de hielo, 30% es agua subterránea y solo el 0.3% es agua superficial distribuida en lagos y ríos. Solo el 0.007% del agua está disponible para el consumo humano (Ágora, 2022), en la *Figura 2* se ilustra la distribución el agua en el mundo.



Los mares y océanos son solo el 0,023% de la masa total del planeta

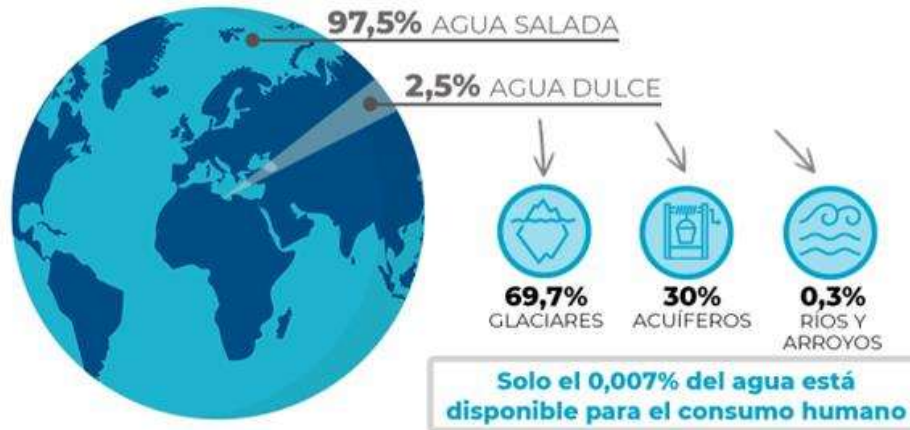


Figura 2. ¿Cuánta agua hay en el mundo?, (Ágora, 2022).

2.2.1. Situación del agua en México

El cálculo más reciente del balance hídrico de México señala que recibe un volumen anual promedio de 1,449 km³ de agua de precipitación, de los cuales 70% regresa a la atmósfera por evapotranspiración. Además del agua que proviene de la precipitación, el país recibe aproximadamente 48 km³ por importaciones de los ríos de las fronteras norte y sur y exporta 0.43 km³ anualmente del río Bravo a los Estados Unidos, de acuerdo con el Tratado sobre Distribución de Aguas internacionales del año 1944. Así, la disponibilidad natural media en el país es de 451.6 km³ de agua en promedio al año. De ese volumen, alrededor del 80% corresponde al escurrimiento superficial (359.04 km³ en 2017) y el restante 20% (92.5 km³) contribuye a la recarga de los acuíferos. El valor de la disponibilidad natural media nacional resulta superior al de la mayoría de los países europeos, pero es bajo en comparación con países como Brasil (8,647 km³), Estados Unidos (3,069 km³) o Canadá (2,902 km³), en la *Figura 3*, se muestra el balance (SNIARN, 2022).



Figura 3. Balance de agua en México, 2017 (SNIARN, 2022).

En la *Figura 4*, se muestra la variación en la precipitación normal en México del año 2000 al 2017, donde la precipitación normal para el periodo de referencia 1981-2010 fue de 740 mm.

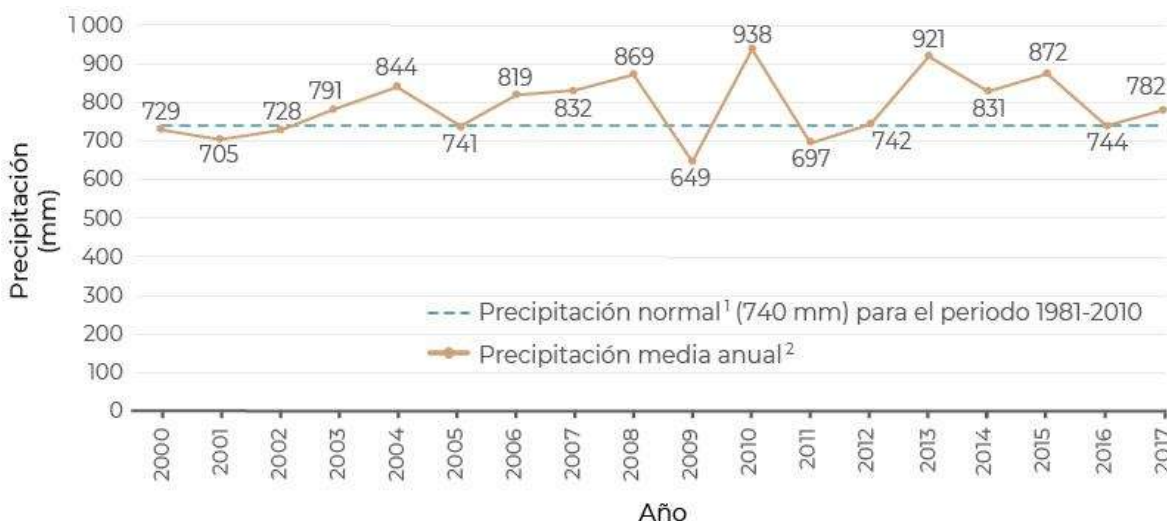


Figura 4. Precipitación media normal en México, 2000-2017 (SNIARN, 2022).

2.2.2. Situación del agua en Michoacán

El estado de Michoacán cuenta con fuentes de agua superficial y subterránea. Dentro de las fuentes superficiales, destacan por su longitud e importancia los ríos Balsas y Lerma. El primero con orígenes en los Estados de Tlaxcala y Puebla, drenando parte del Estado de Oaxaca, Guerrero, México y una gran superficie de Michoacán (55.5%). Los principales afluentes del Balsas son los ríos: Tacámbaro, Cupatitzio, El Marqués y Tepalcatepec. En el caso del Río Lerma, éste se origina en la sierra del Nevado de Toluca, en el Estado de México, drenando una porción de este Estado, así como de Querétaro, Guanajuato, Jalisco y Michoacán (26.3% de su superficie), vertiendo sus aguas finalmente en el lago de Chapala. Entre sus principales afluentes se tienen el Río Angulo y el Río Duero. En la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo se encuentra el Río Grande de Morelia, que escurre en dirección noreste y el Río Queréndaro. Ambos descargan sus aguas directamente al Lago de Cuitzeo (García Rojas, Gómez Sántiz, & Arreola Villa, 2017).

El resto de la superficie del estado (18.2%) corresponde a las Regiones Hidrológicas Armería-Coahuayana y Costa de Michoacán, donde se localizan ríos de longitud relativamente corta, destacando el Coahuayana, Coalcomán y Nexpa. En la superficie completa de las 24 cuencas hidrológicas que pertenecen total o parcialmente al Estado, se genera un escurrimiento virgen de 17,250.1 millones de metros cúbicos/año, de los que 9874 Mm³/año corresponden a la parte de Michoacán (57.2%). Este escurrimiento se concentra en gran medida en los meses de junio a noviembre (82.7%).

En el estado existen 118 presas y 143 bordos, además de varios lagos, entre los que destacan por su tamaño: Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro.



El volumen de aprovechamiento superficial asciende a un total de cerca de 4,000 Mm³/año, en la *Tabla 1* se muestra volumen de aprovechamiento por tipo de uso (CONAGUA, 2013).

Tabla 1. Volumen de aprovechamiento superficial por tipo de uso (CONAGUA, 2013).

Tipo de uso	Volumen de uso (Mm ³)	Tipo de uso	Volumen de uso (Mm ³)
Agroindustrial	0.01	Industrial	71.02
Pecuario	0.10	Múltiples	118.61
Doméstico	4.99	Público urbano	205.79
Servicios	28.87	Agrícola	3281.23
Acuicultura	49.14	Total	3759.75

En lo que respecta al agua subterránea, Michoacán cuenta con 21 acuíferos, que concentran una recarga de 1,946.9 Mm³/año. 8 de los 21 acuíferos se encuentran sobreexplotados, resaltando los acuíferos Morelia-Queréndaro, Pastor Ortiz-La Piedad y Ciudad Hidalgo-Tuxpan como los casos más severos, repercutiendo negativamente en los costos de extracción por el abatimiento en los niveles de agua en los pozos profundos que ponen en riesgo el abasto de agua de la población. Destaca el caso del acuífero Morelia-Queréndaro y Lagunillas-Pátzcuaro donde se estima que la población de las principales localidades del área continuará creciendo por lo menos en el horizonte al 2030. El volumen total sobreexplotado es de 225.4 hm³/año, en tanto que el disponible es de 608.7 hm³ por año (García Rojas, Gómez Sántiz, & Arreola Villa, 2017).

En total se identifican 8,173 concesiones, en su gran mayoría otorgadas al sector agrícola, en la *Tabla 2* se muestran los sectores, número de títulos y volumen de extracción concesionado.

Tabla 2. Concesiones y volumen de aprovechamiento por tipo de uso (CONAGUA, 2013).

Sector	Títulos	Volumen de extracción concesionado (Mm ³ /año)
Agrícola	5179	1013.83
Agroindustrial	14	0.30
Doméstico	134	10.30
Acuicultura	8	0.03
Servicios	211	11.19
Industrial	158	72.78
Pecuario	112	3.51
Público urbano	1987	149.61
Múltiples	380	37.75
Totales	8173	1299.32



Se estima que para el Estado de Michoacán hay aproximadamente una oferta total anual de agua de más de 12,521 millones de metros cúbicos de agua. La demanda total se estima en más de 5,060 millones de m³ como se observa en la *Tabla 3* (CONAGUA, 2013).

Tabla 3. Consumo de agua superficial y subterránea por sector en el estado (CONAGUA, 2013).

Sector	Consumo (Mm ³)	Superficial %	Subterránea %
Agrícola	4295.06	76.40	23.60
Agroindustrial	0.30	3.38	96.62
Doméstico	15.29	32.63	67.37
Acuacultura	49.42	99.42	0.58
Servicios	40.06	72.06	27.94
Industrial	143.80	49.39	50.61
Pecuario	4.47	21.49	78.51
Público urbano	355.40	57.90	42.10
Múltiples	156.36	75.85	24.15
Total	5060.19	74.32	25.68

2.2.3. Situación del agua en Morelia

De acuerdo con la información de OOAPAS (2017) se tiene reportado que el consumo de agua en la ciudad de Morelia proviene principalmente de fuentes superficiales (61.2%) y en segundo lugar subterráneas (38.8%), tal como se muestra en la *Figura 5* (IMPLAN Morelia, 2022).

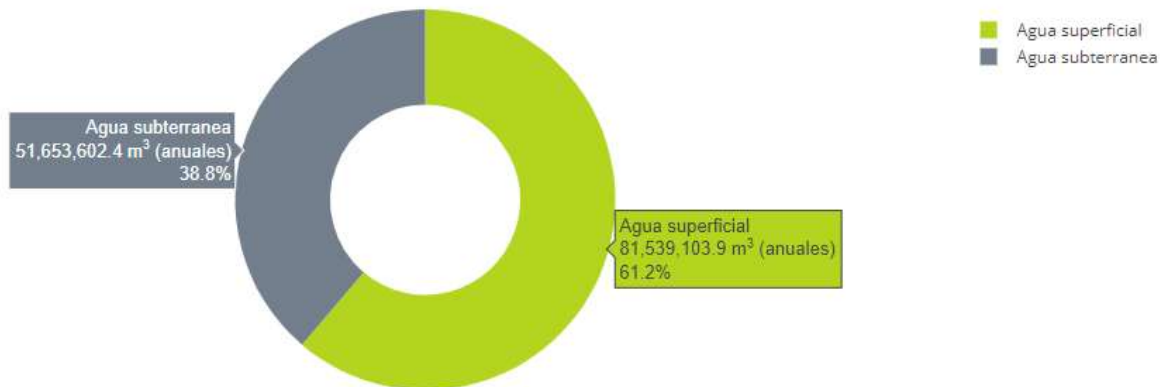


Figura 5. Consumo anual de agua en la ciudad de Morelia (IMPLAN Morelia, 2022).

La precipitación promedio mensual en las cinco estaciones meteorológicas en el municipio, de acuerdo con la información de normales climatológicas de 1981 a 2010, proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra en la *Figura 6*.

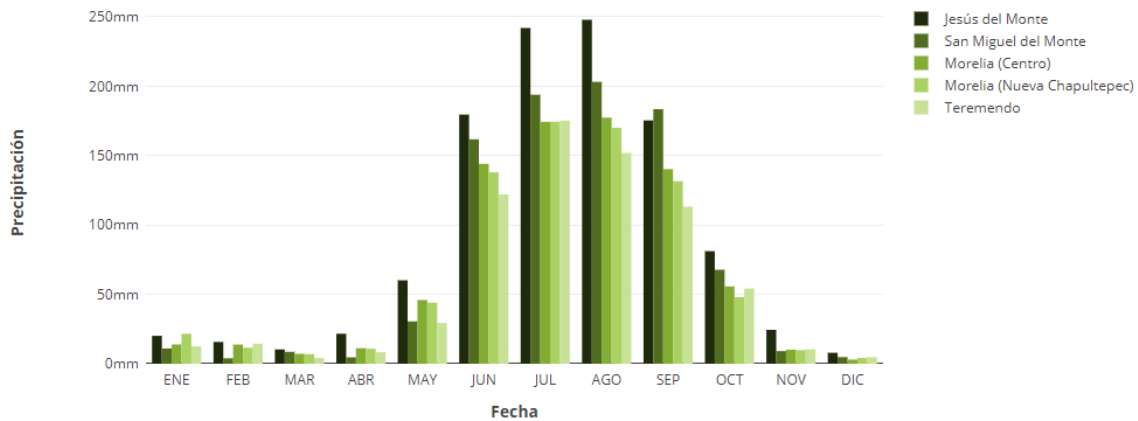


Figura 6. Precipitación promedio mensual (IMPLAN Morelia, 2022).

2.3. Análisis de agua

La calidad del agua puede definirse como una medida de que tan adecuada es esta para un uso específico, y esta se determina no sólo para eliminar contaminantes, sino también para conocer su comportamiento químico o para confirmar su calidad en función de su uso, pero ¿Qué factores determinan la calidad del agua? Son las características físicas, químicas, biológicas y radiológicas, lo que hace que sea apta para un uso determinado y no sea para otro, queda claro que no es necesario que reúna los mismos requisitos un agua destinada al riego que una destinada al consumo humano (Pérez Garrido, León Rodríguez, & Delgadillo García, 2013).

Existen parámetros que por su naturaleza cambiante deben ser medidos in situ, los cuales nos permiten hacer un prediagnóstico de la calidad del agua, estos son: pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos en suspensión y turbidez.

- I. **pH:** La unidad que se utiliza para medir la acidez de una sustancia se le denomina pH, que significa “potencial de Hidrogeno” o “poder de Hidrogeno”. El pH del agua en estado puro a temperatura ambiente es de aproximadamente 7, esto es considerado “neutro” porque la concentración de iones de Hidrogeno (H^+) es exactamente igual a la concentración de Hidróxido (OH^-) producida por la disociación del agua. El aumento de la concentración de H^+ en relación con OH^- produce una solución con un pH inferior a 7, y la solución se considera acida. Por otro lado, si disminuye la concentración de H^+ en relación con OH^- produce una solución con un pH superior a 7, y la solución se considera “alcalina” o “básica”. El término "pH" se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno en esa solución. El rango de pH puede tener valores de 0 a 14 (Meirose, 2021).
- II. **Temperatura:** La temperatura es una medida de la energía cinética media de las moléculas de agua. Se mide en una escala lineal de grados Centígrados o grados

Fahrenheit. La temperatura del agua es un parámetro importante, ya que una temperatura demasiado alta facilita el desarrollo de bacterias en el agua. Además, la temperatura es un parámetro determinante a la hora de realizar calibraciones de otros parámetros medidos en la calidad del agua (HyperPhysics, 2021).

- III. **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica (CE) expresa de forma numérica la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura. Determinar la conductividad, es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua. Los electrolitos son cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico. Los electrolitos pueden ser ácidos, bases o sales (USEPA, 2021).
- IV. **Oxígeno disuelto:** La medición de concentración de oxígeno disuelto (OD) es una prueba clave en la determinación de la contaminación del agua, y en el control del proceso de tratamiento de aguas residuales. En el agua, la cantidad de oxígeno disuelto es variable. En aguas naturales y residuales depende de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. En agua pura, a la temperatura ambiente, el oxígeno se disuelve a una concentración aproximada de 8.5 mg/L. La solubilidad disminuye conforme aumenta tanto la cantidad de sólidos disueltos, así como la temperatura (Pérez Garrido, León Rodríguez, & Delgadillo García, 2013).
- V. **Sólidos en suspensión:** Los sólidos en suspensión es una medida de los sólidos sedimentables (no disueltos) que pueden ser retenidos en un filtro. Son indeseables en el agua ya que pueden causar depósitos en las conducciones, calderas, equipos de bombeo, etc. (Rigola Lapeña, 1990).
- VI. **Turbidez:** La turbidez es la opacidad de un fluido causada por una gran cantidad de partículas individuales que generalmente son invisibles a simple vista, similar al humo en el aire. La medición de la turbidez es una prueba clave de la calidad del agua. La turbidez es causada por partículas suspendidas o disueltas en agua, que dispersan la luz y hacen que el agua parezca opaca o borrosa. Las partículas pueden incluir sedimentos, especialmente arcilla y limo, materia orgánica e inorgánica fina, algas y otros organismos microscópicos. Una turbidez alta puede reducir significativamente la calidad estética de los cuerpos de agua, puede aumentar el costo del tratamiento del agua para beber y procesar alimentos, y puede dañar a las formas de vida acuática al reducir la cantidad de luz solar que entra al cuerpo de agua y al afectar la función de las branquias en los peces (How To Electronics, 2022).



2.4. Normatividad

2.4.1. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional (Secretaría de Salud y Asistencia, 2021).

2.4.2. Normas Mexicanas

La Comisión Nacional del Agua, a través del Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COTEMARNAT); tiene a su cargo la elaboración de las Normas Mexicanas en materia de Análisis de Agua para aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, las Normas Mexicanas de productos químicos utilizados en la potabilización del agua para uso y consumo humano y las Normas Mexicanas de Servicios, lo anterior para fomentar el uso sustentable del agua y la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento (CONAGUA, 2016).

A continuación, se mencionan algunas de las normas mexicanas que se emplearon en el desarrollo de este trabajo.

- I. **NMX-AA-007-SCFI-2013.** Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de la temperatura, cuando se usan instrumentos de medición directa o instrumentos que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura, en aguas naturales crudas no salinas (epicontinentales, subterráneas y pluviales), en aguas salinas (marinas, costeras, de estuarios, esteros, marismas y subterráneas), aguas residuales crudas municipales e industriales y aguas residuales tratadas municipales e industriales en el intervalo comprendido entre 0 °C y 45 °C (SINEC, 2013).
- II. **NMX-AA-008-SCFI-2016.** Esta norma mexicana es de aplicación nacional y establece el método de prueba para la medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, en el intervalo de pH 0 a pH 14 y en un intervalo de temperatura de 0 °C a 50 °C (SINEC, 2016).
- III. **NMX-AA-038-SCFI-2001.** Esta norma mexicana establece el procedimiento para la determinación en campo y en el laboratorio de la turbiedad en muestras de agua residual, residual tratada y natural, en un intervalo de trabajo de 0,01 a 40 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez) (SINEC, 2001).
- IV. **NMX-AA-045-SCFI-2001.** Esta norma mexicana establece el método para la determinación de color aparente y/o verdadero, en aguas naturales, residuales y residuales tratadas con tonos amarillos (SINEC, 2001).



- V. **NMX-AA-093-SCFI-2000.** Esta norma mexicana establece el método de prueba para la determinación de la conductividad electrolítica en agua y es aplicable para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada (SINEC, 2000).

2.5. Contaminación atmosférica

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea totalmente la Tierra; esta se puede dividir en capas concéntricas perfectamente diferenciadas respecto a su composición y densidad. En los 30 km más próximos a la superficie terrestre está concentrada aproximadamente el 99% de su composición. Las capas que componen la atmósfera son la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la ionosfera y la exosfera. De estas capas, la troposfera es la de mayor cercanía a la superficie de la tierra y en la que se produce el tiempo atmosférico. La composición de la troposfera es de 78.00% de nitrógeno, 21.00% de oxígeno, 0.90% de argón, 0.03% de anhídrido acético y agua en cantidades que varían constantemente (vapor, gotas y cristales de hielo) (Andrades Rodríguez & Muñoz León, 2012).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera la contaminación atmosférica como una de las mayores amenazas medioambientales para la salud humana, junto con el cambio climático. Se calcula que cada año la contaminación del aire causa 7 millones de muertes prematuras y provoca la pérdida de años de vida saludable (OMS, 2021).

Los contaminantes atmosféricos, normalmente medidos en la atmósfera urbana, provienen de fuentes móviles (tráfico rodado) y de fuentes fijas de combustión (industrias). Se distingue entre contaminantes primarios, que son los que proceden directamente de la fuente de emisión; y los contaminantes secundarios que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y físicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera, distinguiéndose, sobre todo, la contaminación fotoquímica y la acidificación del medio. Los principales contaminantes se muestran en la *Tabla 4* (Ballester, 2005).

Tabla 4. Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes (Ballester, 2005).

Contaminante	Formación	Estado físico	Fuentes
Partículas en suspensión (PM): PM _{2.5} , PM ₁₀	Primaria y secundaria	Sólido, líquido	Vehículos, procesos industriales, humo de tabaco
Dióxido de azufre (SO ₂)	Primaria	Gas	Procesos industriales, vehículos

Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Primaria y secundaria	Gas	Vehículos, cocinas de gas
Monóxido de carbono (CO)	Primaria	Gas	Vehículos, combustiones interiores, humo de tabaco
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	Primaria y secundaria	Gas	Vehículos, industria, humo de tabaco, combustiones en interiores
Plomo (Pb)	Primaria	Sólido	Vehículos, industria
Ozono (O ₃)	Secundaria	Gas	Vehículos (foto-oxidación de NO _x y COVs)

La contaminación antropogénica del aire se incorpora principalmente a los elementos del agua de lluvia en la capa debajo de las nubes. En este sentido, la precipitación es un elemento importante para la autolimpieza del aire. Investigaciones han demostrado que después de la lluvia, o incluso durante esta, el aire contiene significativamente menos contaminantes que antes de la precipitación (Pokrývková, Lackóová, Fuska, Tátošová, & Policht-Latawiec, 2016)

El contacto del agua de lluvia con los contaminantes atmosféricos genera, entre otros efectos, el fenómeno llamado lluvia ácida, el cual ha sido altamente identificado por la afectación de la calidad del agua, como producto de la presencia de aniones de ácido sulfúrico (SO₄²⁻) y de ácido nítrico (NO₃⁻), principalmente (Iqbal & Mido, 2020).

Por lo tanto, la acidificación implica la presencia de sulfatos y nitratos, los cuales se forman por oxidación de los dióxidos de azufre (SO₂) y dióxidos nitrógeno (NO_x) presentes en las emisiones gaseosas, provenientes principalmente de fuentes antropogénicas. Se estima que las fuentes antropogénicas aportan más del 50% de las emisiones de SO₂ y más del 30% de las emisiones de NO_x (Schwedt, 2001).

El agua de lluvia es ligeramente ácida porque el agua y el dióxido de carbono del aire forman al ácido carbónico y tiene un pH entre 5.7 y 7. En lugares contaminados por ácido sulfúrico y ácido nítrico, el pH de esa lluvia varía entre 5 y 3 (Benitez, 1993).

La lluvia ácida tiene impactos negativos sobre ecosistemas artificiales y sobre el hombre. Puede deteriorar edificios, puentes, construcciones, monumentos, materiales metálicos y

equipos electrónicos, así como afectar la salud humana. Este último aspecto es uno de los más difíciles de evaluar por la complejidad de contaminantes que se generan (Likens & Bormann, 1974).

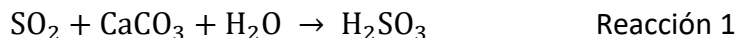
En los bosques la situación es un tanto distinta, la lluvia ácida no mata directamente a plantas y árboles, sino que actúa a través de ciertos mecanismos que los debilitan, haciéndolos más vulnerables a la acción del viento, el frío, las sequías y los parásitos. La lluvia ácida afecta directamente las hojas de los vegetales, despojándolas de su cubierta cerosa y provocando pequeñas lesiones que alteran la acción fotosintética. Con ello, las plantas pierden hojas y, así, la posibilidad de alimentarse adecuadamente. (Benkorits, 1982).

Los niveles de contaminantes dependen del grado de emisiones de contaminantes de diversas fuentes, lo que aumenta la concentración de éstos en la atmósfera. Su presencia disminuye en la medida que las precipitaciones sean mayores. Dependiendo de la intensidad y duración de la lluvia, se realiza un lavado atmosférico, que termina con el transporte de los elementos contaminantes hacia la tierra (Bravo, Sosa, & Torres, 1991).

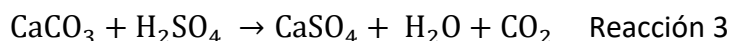
La lluvia se convierte en uno de los principales mecanismos por los cuales los contaminantes atmosféricos retornan a la superficie terrestre, lo que posibilita la toma de mediciones de la concentración de éstos, en función de la cantidad de agua caída y almacenada mediante un proceso de captación. Lo anterior es aplicable especialmente a los centros urbanos industrializados que, en general, presentan los mayores problemas de contaminación, susceptibles de ser medidos. Mediante la caracterización de la lluvia, se determina su composición y grado de acidez, con el objeto de conocer su estado de agresividad hacia el suelo, el agua y los materiales (Benkorits, 1982).

2.5.1. Química de la lluvia ácida

El SO₂ es altamente soluble en agua y relativamente estable en la atmósfera. Se estima que permanece en esta de 2 a 4 días, intervalo durante el cual puede ser transportado a más de mil kilómetros del punto de emisión. Actúa como agente oxidante o reductor y reacciona foto-químicamente o catalíticamente con otros componentes en la atmósfera. El SO₂ puede producir SO₃, H₂SO₄ y sales del ácido sulfúrico, como se presenta en las reacciones 1 y 2, siendo uno de los mayores precursores de la lluvia ácida (Japan International Cooperation Agency, 1990).

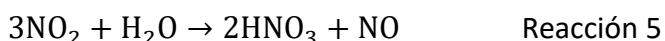
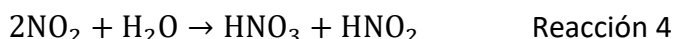


Los carbonatos son reemplazados por sulfatos, los cuales son más solubles en agua, como se indica en la reacción 3



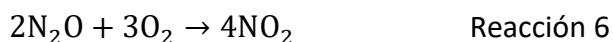
El sulfato de calcio, o yeso, formado en este proceso es lavado de nuevo dejando una superficie descolorida.

Los óxidos de nitrógeno incluyen los compuestos gaseosos: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxido nitroso (N₂O), sesquióxido (N₂O₃), tetra-óxido (N₂O₄) y pentóxido (N₂O₅). Los dos óxidos de nitrógeno considerados como mayores contaminantes atmosféricos primarios son el NO y el NO₂. El NO₂ es fácilmente soluble en agua, más pesado que el aire, en el rango ultravioleta el NO₂ es un buen absorbedor de energía. Por lo tanto, juega un papel importante en la producción de contaminantes secundarios y con el vapor de agua existente en el aire por la humedad forma ácido nítrico, ácido nitroso y óxido nítrico como se indica en las reacciones 4 y 5 (Lewis & Grant, 1980).



Ambos ácidos producen acidez en el agua lluvia. Además, se combinan con el amoníaco (NH₃) de la atmósfera para formar nitrato de amonio (NH₄NO₃).

El óxido nítrico (NO) es emitido a la atmósfera en cantidades mayores que el dióxido de nitrógeno (NO₂). Se forma en procesos de combustión a altas temperaturas cuando el oxígeno atmosférico se combina con el nitrógeno, de acuerdo a la reacción 6:



2.6. Sistemas de monitoreo

Los sistemas de monitoreo son indispensables en las industrias, donde se pueden implementar con el objetivo de optimizar los recursos disponibles, así como un apropiado uso del recurso, donde es necesario medir y/o conservar constantes algunas variables (SUHISSA, 2018).

Normalmente, son los operadores quienes llevan a cabo un seguimiento manual de las variables, utilizando instrumentos de medición, la necesidad de obtener información en tiempo real y los altos costos de un seguimiento manual, exigen la automatización y el monitoreo de ciertas variables, sin la intervención humana para obtener información de forma inmediata y ahorrar en costos de inspección y control.

Es importante definir algunos conceptos en torno a los sistemas de monitoreo local y remoto, ya que existe cierta confusión en los términos empleados cuando se habla de sistemas de monitoreo y control.

El monitoreo generalmente significa ser consciente del estado de un sistema, para observar una situación de cambios que se pueda producir con el tiempo, o sea que no interviene ninguna cuestión manual o automatizada sobre el control de las variables, es únicamente



la visualización de los cambios en la instrumentación según las condiciones del sistema; este monitoreo puede realizarse con el personal y sus herramientas en mano, o bien con la intervención automática de los equipos de instrumentación integrados con dispositivos de transmisión a través de redes locales o remotas, que envíen información a un monitor o a una base de datos (SUHISSA, 2018).

Por otra parte existen los sistemas de monitoreo y control como es el caso de un sistema SCADA que es el acrónimo de Supervisory Control and Data Acquisition (Control de Supervisión y Adquisición de Datos) que es un sistema de monitoreo y control basado en computadores, que permite supervisar y controlar a distancia una instalación de cualquier tipo; pueden establecer un intercambio de datos entre diferentes componentes que lo integran para llevar a cabo la automatización del monitoreo y supervisión de procesos, permiten entre otras funciones el monitoreo de datos en tiempo real, la supervisión y gestión de alarmas, la conversión de unidades, el almacenamiento histórico, el control de procesos, la generación de reportes y la administración del uso del sistema (SUHISSA, 2018).

El flujo de la información en los sistemas SCADA consiste en un fenómeno físico representado por la variable que se desea medir. Dependiendo del proceso, la naturaleza del fenómeno es muy diversa: presión, temperatura, flujo, potencia, intensidad de corriente, voltaje, pH, densidad, etc. Este fenómeno debe traducirse a una variable que sea inteligible para el sistema SCADA, es decir, en una variable eléctrica (SIAPA, 2014). Para ello, se utilizan sensores o transductores, éstos convierten las variaciones del fenómeno físico en variaciones proporcionales de una variable eléctrica. Las variables eléctricas más utilizadas son: voltaje, corriente, carga, resistencia o capacitancia. Sin embargo, esta variedad de tipos de señales eléctricas debe ser procesada para ser entendida por el computador digital. Para ello se utilizan acondicionadores de señal, cuya función es la de referenciar estos cambios eléctricos a una misma escala de corriente o voltaje. Además, provee aislamiento eléctrico y filtraje de la señal con el objeto de proteger el sistema de ruidos originados en el campo (Construmática, 2010). Una vez acondicionada la señal, la misma se convierte en un valor digital equivalente.

Generalmente, esta función es llevada a cabo por un circuito de conversión analógico/digital y el computador almacena esta información, la cual es utilizada para su análisis y para la toma de decisiones. Simultáneamente, se muestra la información al usuario del sistema, en tiempo real.

2.6.1. Términos utilizados en SCADA

A continuación, se describen algunas definiciones de términos empleados en los Sistemas de Control de Supervisión y Adquisición de Datos o SCADA:

- I. **Controlador lógico programable:** Los PLC (acrónimo en inglés de Programmable Logic Controller) son microcomputadoras especialmente preparadas para cumplir la función de un control robusto para máquinas automáticas y sistemas de alta



estabilidad durante su funcionamiento. Todas sus entradas y salidas están preparadas para operar directamente con sensores (SEIKA, 2019).

- II. **Señal analógica:** Son variables eléctricas que evolucionan en el tiempo en forma análoga a alguna variable física. Estas variables pueden presentarse en la forma de una corriente, una tensión o una carga eléctrica. Varían en forma continua entre un límite inferior y un límite superior (Miyara, 2004).
- III. **Señal digital:** Es la representación de una señal analógica con solo dos estados perfectamente diferenciados, 0 y 1 (hay o no hay). Es decir, una señal analógica de voltaje puede ser convertida a una señal eléctrica digital con un número finito de valores entre su límite máximo y mínimo. Las señales digitales tienen la ventaja que se pueden procesar, y almacenar con gran facilidad (SIAPA, 2014).
- IV. **Indicador:** disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos (López, Zurita, Cerven, & Naranjo, 2017).
- V. **Elemento primario:** Es el principal componente de un sensor, están en contacto directo con la variable física y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variable controlada (SIAPA, 2014).
- VI. **Transductor:** Es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente a la salida. El transductor sirve para obtener la información de entornos físicos y químicos y conseguir señales o impulsos eléctricos o viceversa. Los transductores siempre consumen algo de energía por lo que la señal medida resulta debilitada (Logicbus, 2022).
- VII. **Transmisor:** Es un instrumento que se instala en campo y captan la variable del elemento primario o transductor y la transmiten a distancia utilizando señales electrónicas, que pueden ser analógicas o digitales (SIAPA, 2014).
- VIII. **Sensor:** Es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud física u otras alteraciones del entorno y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, la cual somos capaces de cuantificar y manipular. Consta de tres componentes principales: 1) El área sensible contiene el sistema de sensores basado en una tecnología determinada, 2) el circuito de procesamiento convierte la variable física en una variable eléctrica y 3) la salida de señales, contiene la electrónica que está conectada a un sistema de control (Balluff, 2021).



2.6.2. Componentes electrónicos

Un componente electrónico, es un dispositivo que forma parte de un circuito electrónico, al desarrollar el proyecto fue necesario el empleo de ciertos componentes que se describen a continuación.

- I. **Resistencia:** Una resistencia limita la corriente eléctrica que corre a través de un circuito, forzando a que la corriente fluya a través de un pequeño cable rodeado por aislamiento. Debido a que una resistencia limita el paso de la corriente, también se produce una caída de voltaje, las resistencias se miden en ohmios (Ω), cuanto mayor es la cantidad de ohmios, más resistencia posee (Douglas-Young, 2000).

- II. **Transistor:** Un transistor es un dispositivo electrónico semiconductor, es utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada, operan sobre un flujo de corriente, funcionan como amplificadores (reciben una señal débil y generan una fuerte) o como interruptores (recibiendo una señal y cortándole el paso). La función del transistor depende de cuál de las tres posiciones ocupa en determinado momento, puede ser 1) Activa: permite el paso de un nivel de corriente variable, 2) Corte: no deja pasar la corriente eléctrica, y 3) Saturación: Deja pasar todo el caudal de la corriente eléctrica. Un transistor se compone de tres elementos, los cuales son: base, colector y emisor. La primera es la intermediaria entre el emisor (por donde entra la corriente) y el colector (por donde sale la corriente), esto lo hace mediante una corriente eléctrica menor que recibe la base (Raffino, 2021).

2.6.3. Protocolos de comunicación

Un proceso de comunicaciones es un sistema de reglas que permiten que dos o más dispositivos de un sistema se comuniquen entre ellos para transmitir información por medio de cualquier tipo de variación de una magnitud física, a continuación, se describen los protocolos de comunicación empleados en este trabajo.

- I. **Comunicación Serial:** La comunicación serial es el método más utilizado en el entorno de Arduino, también es conocida como Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART), se utiliza para realizar el enlace entre una tarjeta de Arduino con otra tarjeta Arduino o NodeMCU. Se le llama comunicación serial porque la transmisión se realiza bit a bit, las tarjetas Arduino y NodeMCU ofrecen puertos especiales como Rx/Tx, un puerto para recibir y otro para transmitir información (Goilav & Loi, 2016).

- II. **Protocolo TCP/IP:** Los protocolos para la transmisión de datos en internet más importantes son TCP (Transmission Control Protocol) e IP (Internet Protocol), de manera conjunta (TCP/IP) podemos enlazar los dispositivos que acceden a la red. TCP/IP provee conectividad de extremo a extremo especificando como los datos



deberían ser formateados, direccionados, transmitidos, enrutados y recibidos por el destinatario (Interserver, 2021).

- III. **Protocolo HTTP:** HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) es la base de la comunicación de datos para la World Wide Web, el hipertexto, es texto estructurado que utiliza hipervínculos entre nodos que contienen textos (Interserver, 2021).

2.7. Instrumentación

La instrumentación ha permitido el avance tecnológico de la ciencia actual como la automatización de los procesos industriales; ya que la automatización es solo posible a través de elementos que puedan sentir o transmitir lo que sucede en el ambiente, para luego tomar una acción de control preprogramada que actúe sobre el sistema para obtener el resultado previsto (Gutiérrez Hinestroza & Iturralde Kure, 2017).

A continuación, se describen las tecnologías mediante las cuales fue posible el desarrollo de este trabajo.

2.7.1. Arduino

Arduino es una plataforma de microcontroladores de hardware libre y software de código abierto para el desarrollo de productos y proyectos electrónicos. Una placa de Arduino es un microcontrolador que se especializa en leer y solicitar datos de una amplia gama de fuentes para completar tareas específicas que han sido programadas. Desde el lenguaje de codificación, los usuarios pueden programar el microcontrolador para solicitar los datos de distintas maneras, desde simplemente informar como un valor numérico, encender una luz, mover un motor, o incluso enviar un mensaje de texto. El lenguaje de codificación en Arduino es relativamente simple y ha sido utilizado por muchos para construir proyectos científicos de bajo costo, para probar los principios de la química y física, o para comenzar con la programación y la robótica (Arduino, 2021).

El código de Arduino se divide en tres secciones básicas, al principio del código se declaran las variables y se incluyen las librerías de terceros. En la sección central del código, conocida como la Setup (configuración), los primeros comandos inician los sensores o las fuentes de información que son utilizadas en el código. Y finalmente, la última sección del código de Arduino se conoce como loop (bucle), que es el cuerpo del código que Arduino ejecuta continuamente. En su conjunto, Arduino permite al usuario manipular fácilmente componentes electrónicos para sus necesidades de desarrollo.

La placa dispone de varios pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que pueden conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 Voltios. También dispone de entradas y salidas analógicas, para obtener



datos de sensores o enviar señales de control PWM (porpulse-width modulation) a otros dispositivos (Enciso & Vargas, 2018).

Existen diferentes tipos de placas de desarrollo de Arduino, cada una cuenta con características específicas que cumplen con los requerimientos del proyecto desarrollado, las diferencias radican en el número de entradas / salidas digitales y analógicas, el tamaño de la placa y el procesador que utiliza, los tipos más comunes son: Arduino UNO, Arduino DUE, Arduino Leonardo, Arduino MEGA 2560, Arduino MEGA ADK, Arduino MICRO, Arduino NANO, Arduino YUN y Arduino FIO.

Después de revisar los diferentes tipos de placas de desarrollo de Arduino, se optó por utilizar un Arduino NANO, a continuación, se listan algunas de sus características:

- Microcontrolador: ATmega328
- Frecuencia de operación: 16 MHz
- 8 puertos análogos de entrada
- 14 puertos de entrada/salida digital (incluyendo 6 PWM)
- Capacidad de memoria flash: 32 KB
- Puerto Mini USB
- Dimensiones: 45 x 18 mm.



Figura 7. Placa de desarrollo Arduino NANO (Stereon, 2021).

2.7.2. NodeMCU

NodeMCU es una placa de desarrollo de código abierto con un módulo ESP8266 (módulo que da acceso a cualquier microcontrolador a su red Wifi) integrado, el beneficio de esta placa de desarrollo es el contar con este módulo Wifi que conecta el sistema a internet, cuenta con pines digitales y uno analógico para la conexión de diversos módulos y sensores, tiene un procesador SoC (System on a Chip) y 16 líneas de GPIO (General Purpose Input/Output) y se alimenta con 5V (Negara, Tulloh, Hadiansyah P.N, & Zahra, 2019). A continuación, se listan algunas de las características técnicas de la placa de desarrollo NodeMCU con módulo ESP8266:

- Alimentación: 5 VCC
- 13 pines digitales
- 1 pin analógico
- Puerto micro USB
- 4 MB de memoria FLASH (32MB)
- Wi-Fi 2.4 GHz 802.11 b / g
- Soporta WPA / WPA2
- Protocolos TCP / IP integrados

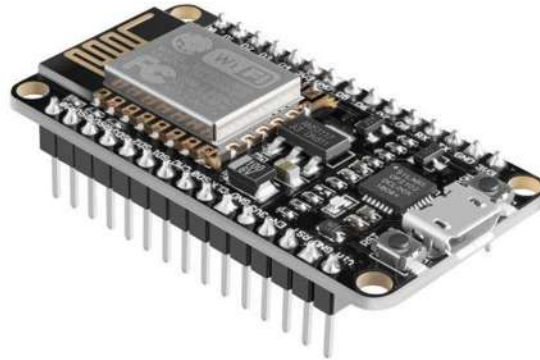


Figura 8. Placa de desarrollo NodeMCU (ESP8266) (Stereon, 2021)

2.7.3. Internet of Things (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) es una red de dispositivos físicos. Kevin Ashton (1999) del Instituto Tecnológico de Massachusetts propuso este concepto y lo definió como una red de cosas, que incluye computadoras, teléfonos móviles, refrigeradores, puertas y automóviles que se conectan entre sí y comparten datos a través de Internet. Existen tecnologías similares que están estrechamente relacionadas con el IoT, como Machine-to-Machine (M2M), Internet of Everything (IoE), computación ubicua y sistemas de Internet integrados. Las cosas físicas deben contener microcontroladores y sensores para conectarse inteligentemente entre sí. Estos microcontroladores y sensores enviarán datos a un servidor en la nube de IoT que funciona como un centro para el intercambio de datos (Serikul, Nakpong, & Nakjuatong, 2018).

2.7.4. ThingSpeak

ThingSpeak es un servicio de plataforma de análisis del Internet de las cosas, que permite agregar, visualizar y analizar flujos de datos en tiempo real en la nube. ThingSpeak puede recibir datos desde un dispositivo conectado a internet, crear una visualización instantánea de datos en tiempo real y enviar alertas (ThingSpeak, 2021).

La plataforma ThingSpeak organiza la información en canales de datos. Cada canal incluye ocho campos que pueden contener cualquier tipo de datos, más tres campos para la

ubicación y un campo para el estado. Cada canal también se caracteriza por una identificación única, un nombre y una descripción. No es posible acceder a los campos individualmente; todas las operaciones de lectura/escritura se realizan a nivel de canal para optimizar las llamadas remotas. Todos los datos entrantes reciben una identificación secuencial y una marca de tiempo (con una resolución de 1 segundo). Los canales son privados de forma predeterminada, pero también se pueden hacer públicos, en cuyo caso no se requiere ninguna clave de lectura. Los canales se proporcionan sin cargo para proyectos no comerciales siempre que no requieran más de 8200 mensajes/día, es decir 5 mensajes/minuto (Viegas, Dias Pereira, Girão, & Postolache, 2021).

2.7.5. Base de datos

Una base de datos es una recopilación organizada de información o datos estructurados, que normalmente se almacena de forma electrónica en un sistema informático. Normalmente, una base de datos está controlada por un sistema de gestión de bases de datos (DBMS). En conjunto, los datos y el DBMS, junto con las aplicaciones asociadas a ellos, reciben el nombre de sistema de bases de datos, abreviado normalmente a simplemente base de datos. Los datos de los tipos más comunes de bases de datos en funcionamiento actualmente se suelen utilizar como estructuras de filas y columnas en una serie de tablas para aumentar la eficacia del procesamiento y la consulta de datos. Así, se puede acceder, gestionar, modificar, actualizar, controlar y organizar fácilmente los datos. La mayoría de las bases de datos utilizan un lenguaje de consulta estructurada (SQL) para escribir y consultar datos. (Oracle, 2021).

2.7.6. MySQL

MySQL es un sistema de gestión de bases de datos relacionales de código abierto basado en SQL. Se diseñó y se optimizó para las aplicaciones web y puede utilizarse en cualquier plataforma. MySQL es el DBMS que se encuentra detrás de algunos de los sitios web y aplicaciones basadas en web más importantes del mundo, como Airbnb, Uber, LinkedIn, Facebook, Twitter y YouTube (Oracle, 2021).

2.8. Diseño

El diseño es un proceso de creación visual con un propósito. A diferencia de la pintura y la escultura, que son la realización de las visiones personales de un artista, el diseño cubre exigencias prácticas (Wong, 1995).

Para el diseño del sistema de monitoreo se deben tener en cuenta múltiples factores y restricciones en el diseño, a continuación, se muestra una lista de opciones de diseño basada en los desafíos encontrados por Pitula y colaboradores (Pitula, Dysart-Gale, & Radhakrishnan, 2010).

- I. **Fuente de alimentación:** la alimentación del prototipo puede ser mediante red eléctrica, batería, o paneles solares.



- II. **Conectividad:** para el almacenamiento de datos, el prototipo puede conectarse a Wi-Fi, GPRS, SMS, o bien, guardar la información en una memoria.
- III. **Comunicación:** la forma en la que el usuario podrá visualizar la información en tiempo real puede ser mediante el uso de una pantalla LCD, interfaz web, o una aplicación de smartphome.
- IV. **Condiciones de funcionamiento:** para optimizar el funcionamiento del prototipo, se debe considerar si este necesita alguna carcasa impermeable, o algún accesorio adicional, para proteger los componentes electrónicos de la intemperie.

En lo que respecta al diseño de un sitio web, se requirió de una metodología para realizarla de una forma más adecuada. Existen varios planteamientos, pero la metodología desarrollada por Luján Mora (2002) sirvió para desarrollar el sitio web fácilmente (Luján Mora, 2002), en cada apartado se analizan diferentes aspectos:

- I. **Análisis de requerimientos:**
 1. Especificaciones del sitio: ¿Qué desea hacer?, ¿Cómo desea que se visualice?
 2. Contenido: Información, imágenes, documentos que el sitio debe incorporar.
 3. Objetivos: El objetivo general del sitio.
 4. Público destino: Se debe estudiar hacia quien va dirigido el sitio, quedades tiene, que le gusta, que necesita, etc.
 5. Inversión prevista: De cuánto dinero y recursos se dispone para realizar el sitio.
- II. **Arquitectura y tecnología:**
 1. Infraestructura: ¿Se utilizará servidor propio, hosting, servidor dedicado o alguna solución en la nube? ¿Qué ancho de banda se necesita?
 2. Tecnología web: Considere si está realizando un sitio estático o dinámico. En cualquier caso, ¿Qué tecnologías web se utilizarán? Y ¿Qué gestor de base de datos se usará?
- III. **Diseño de la estructura lógica y física del sitio:**
 1. Elaboración de un diseño del sitio que incluya: página principal, menú de navegación, secciones de la página, entre otros.
 2. Estructura física: ¿Qué carpetas y archivos utilizará? ¿Seguirá un esquema parecido a la estructura lógica o será diferente?
- IV. **Creación de contenidos:**
 1. Definir el texto que aparecerá en cada sección del sitio (si este es tomado de una base de datos, entonces incluye la creación y alimentación de la base de datos).
- V. **Diseño gráfico:**
 1. Colores: Se elige la paleta de colores que se utilizará, se escriben sus nombres y códigos (RGB, Hexadecimal).



2. Tipografía: Se indica la fuente y familia de fuentes que utilizará, y el tamaño por defecto que utilizará en los párrafos.
3. Otros elementos: Indicar el estilo de botones, los logotipos, iconos, ilustraciones y demás elementos gráficos que posiblemente se empleen.

VI. Creación de las páginas estáticas

VII. Creación de las páginas dinámicas

VIII. Verificación del funcionamiento del sitio

1. Prueba de conexión con la base de datos
2. Verificación de enlaces y recursos empleados, todos los enlaces deben ser funcionales, todas las imágenes deben cargar adecuadamente, así como el resto de recursos.
3. Prueba del sitio en diferentes navegadores y dispositivos.
4. Análisis del tiempo de carga y rendimiento.

IX. Puesta en marcha

2.9. Calibración

La calibración consiste en utilizar un estándar de medición, para determinar la relación entre el valor mostrado por el instrumento de medición y el valor verdadero. La confiabilidad de un instrumento de medición se puede garantizar al calibrar de acuerdo con un estándar de medición (KEYENCE, 2022).

En este trabajo cada sensor fue calibrado y validado para asegurar su correcto funcionamiento. Se compararon las mediciones dadas por el equipo desarrollado con soluciones patrón para calibración y además se compararon las mediciones con un equipo comercial. A continuación, se muestra el procedimiento realizado para la calibración:

1. Limpiar la sonda del sensor con agua destilada y después secarla con un pañuelo desechable.
2. Colocar correctamente el sensor dentro de la solución estándar de calibración.
3. Efectuar la medición.
4. Registrar el valor del parámetro y del voltaje leído por el dispositivo.
5. Retirar la sonda de la solución estándar de calibración.
6. Repetir los pasos de 1 a 5, 10 veces.
7. Calcular el porcentaje de error relativo empleando la *Ecuación 1*, y si es mayor al que garantiza el fabricante, se calibra el sensor.
8. Repetir los pasos de 1 a 7 para cada sensor.

$$Error\ relativo\ (\%) = \left| \frac{VE - VA}{VA} \right| \times 100\%$$

Ecuación 1. Error relativo (%).

Donde: *VE* (Valor Experimental) es el valor medido con el sensor y *VA* (Valor Aceptado) es el valor de la solución estándar de calibración.



3. ANTECEDENTES

3.1. Crisis de agua

Actualmente el planeta afronta una crisis de agua dulce, lo que afectó a personas en muchos países y regiones. Aunque la cantidad total de agua dulce en la Tierra es suficiente para la población del mundo, la distribución del agua se extendió de manera desigual, por lo que ocurrió la escasez de agua (Qadir, Boers, Schubert, Ghafoor, & Murtaza, 2003). Lo que nos ha obligado al aprovechamiento de otras fuentes alternativas.

Existen varios tipos de escasez de agua, pero las dos causas principales son la escasez de lluvia y la cantidad insuficiente de agua. Menos lluvia afecta el ciclo hidrológico y causa daños al medio ambiente. La falta de agua afecta a muchas zonas, lo que provoca una grave escasez y una demanda creciente. Es un problema de difícil solución ya que es difícil trabajar contra la naturaleza, por lo que el recurso hídrico es un tema importante (Whitehead, Wilby, Battarbee, Kernan, & Wade, 2009).

La población en el mundo aumentó dramáticamente en los últimos años, lo que causó algunos problemas, como la reducción de la superficie de infiltración, aumento en la demanda de agua y la contaminación del agua (Strohschön, y otros, 2013).

La escasez de agua tiene sus consecuencias en muchas regiones diferentes, afectando el desarrollo económico y social, así como la vida cotidiana de los ciudadanos comunes. Podría afectar gravemente las actividades institucionales como los servicios médicos, las actividades agrícolas y finalmente a la población (Ling, 2022).

En México particularmente, la oferta nacional de recursos hídricos permite el abastecimiento de un alto porcentaje de la población mediante fuentes superficiales y subterráneas (como se ha expuesto en capítulos previos), lo cual no significa que el país no deba preocuparse por la crisis de agua que se vive en el planeta. Por el contrario, es importante preservarla para garantizar el suministro en el futuro, además de buscar fuentes alternativas para uso doméstico y riego como el agua lluvia, cuyo beneficio al consumidor se da directamente en la medida en que es una fuente no tributada a la que toda la población puede acceder, siempre y cuando su uso no represente ningún riesgo para la salud.

3.2. Aprovechamiento del agua de lluvia

Debido a la dependencia del ser humano por el recurso hídrico, es motivo de preocupación la crisis que puede ocurrir con relación a la escasez del agua. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), una de cada seis personas en el mundo se encuentra en situación de estrés hídrico (FAO, 2022), al grado de que en 2018 Ciudad del Cabo fue noticia porque anunció a sus habitantes que esta ciudad de Sudáfrica alcanzaría el “Día cero del agua” el 22 de abril de ese año. Tras revisar sus reservas y ritmo de consumo, a los pocos días se modificó la fecha: 12 de abril. El “Día cero del agua” fue establecido como el cierre



del sistema de abasto de agua del organismo operador local. Se pondría en su lugar un sistema para suministrar de manera controlada 25 litros de agua por habitante al día (lhd). A su vez, las autoridades contactaron a un distrito de riego de la cuenca para que les cediera parte de su agua. Esta combinación de esfuerzos permitió un mes después empujar el “Día cero del agua” a la primera semana de mayo, y posteriormente se anunciaba que el evento se cancelaba por el resto del año. En junio de 2019, ya con las presas llenándose con las lluvias, pudo anunciarse que ese año tampoco habría día cero. Ciudadanía y gobierno lograron llegar a la temporada de lluvia, una victoria para la gestión del agua urbana y un caso para estudiar (Ziervogel, 2019).

En regiones donde no se tiene acceso al agua subterránea o superficial o esta no es químicamente apta para consumo humano de forma directa, es válido analizar la posibilidad del aprovechamiento de las precipitaciones para dicho uso.

Aunque la disponibilidad del agua dulce es relativamente adecuada en México (como se expuso en el capítulo 2.2.1. *Situación del agua en México*), el agua potable no está disponible para todas las regiones del país.

En México, se cuenta con el Programa Nacional Hídrico 2020-2024, documento rector de la política hídrica en México (CONAGUA, 2020), y en este se propone que todos los mexicanos tengan acceso al agua y saneamiento, que los sectores productivos la aprovechen eficientemente, proteger a la población de inundaciones y sequías, preservar el ciclo del agua y mejorar la gobernanza para incluir a los ciudadanos en la toma de decisiones (Gleason Espíndola, 2020).

La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, ha puesto en marcha un programa social llamado “Cosecha de lluvia”, que tiene como propósito el mejorar el abasto de agua de personas que viven en colonias de bajos ingresos con la instalación de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia. La cosecha de lluvia tiene diversos beneficios ambientales como: 1) Reducir el flujo de agua a los drenajes, lo que se traduce en menos inundaciones; 2) Disminuir la cantidad de energía para bombear y transportar agua a las viviendas; 3) Facilitar el acceso al servicio hídrico en viviendas entre 5 y 8 meses del año lo que se traduce en una reducción de la factura del agua y; 4) Contribuir a la no sobreexplotación del acuífero y a su recuperación al reducir la demanda (SEDEMA, 2022).

Un sistema de captación de agua de lluvia se puede definir como un sistema hidráulico para la recolección y uso del agua de lluvia, de manera general está integrado por: área de captación; puntos de recolección (canales y bajantes de agua pluvial); conducción; interceptor de primeras lluvias; almacenamiento (cisterna), y tratamiento. Tiene como propósito captar el agua de lluvia en las azoteas, conducirla y aprovecharla como fuente alterna de agua potable para el uso doméstico (ARCSA, 2013).



3.3. Calidad del agua de lluvia

La calidad del agua de lluvia no se ha estudiado a fondo, en varios lugares se desconocen sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, que dependen de diversos componentes presentes en el aire por actividades antrópicas y condiciones naturales. Su evaluación permite definir en cierta medida la calidad del aire y los potenciales contaminantes que pueden hacerse presentes en mayor o menor concentración (Ospina Zuñiga & Ramírez Arcila, 2014).

(Gillette & Sinclair, 1990) y (Rastogi & Sarin, 2005), indican que la lluvia es un mecanismo muy efectivo para absorber y remover aerosoles presentes en la atmósfera, gracias a los procesos de arrastre “en la nube” y por “debajo de la nube”.

(Yao, y otros, 2016) realizaron una investigación para determinar la composición química del agua de lluvia en tres sitios rurales de la provincia de Hebei, en el norte de China. El propósito principal del estudio fue obtener una comprensión inicial de la química del agua de lluvia, así como identificar las posibles fuentes que contribuyen en su composición y finalmente, explorar la influencia de fuentes terrestres sobre la composición iónica en zonas no urbanas del norte de China. Entre los resultados están: 1) que existe una limitada concentración de aniones en el agua de lluvia (de acuerdo con (Migliavacca, Teixeira, Wiegand, Machado, & Sanchez, 2005) y (Xu & Han, 2005), esto se debe a la poca presencia de HCO_3^- y de ácidos orgánicos en el agua de lluvia); 2) que el catión calcio fue el de mayor abundancia en el estudio, seguido por el ion amonio, 3) que los aniones predominantes son el sulfato y el nitrato (estos datos coinciden con otros estudios realizados por (Huang, Xu, Peng, Zhang, & Lan, 2009) y (Larssen, y otros, 1999)) y 4) que se detectaron además altas concentraciones del ion F^- . de acuerdo con (Larssen, y otros, 1999), las concentraciones de F^- se pueden deber a la combustión del carbón con alto contenido de fluoruros.

(Bolaños, y otros, 2019) desarrollaron un estudio preliminar en Costa Rica, específicamente en el Parque Nacional “Volcán Poás”, durante los meses de mayo a octubre del 2017 por el Laboratorio de Química de la Atmósfera, de la Universidad Nacional, los parámetros de calidad del agua de lluvia analizados fueron: pH, conductividad eléctrica y aniones (F^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}). Dentro de los resultados obtenidos se tiene: $\text{pH}=2.50$; 15.48 ± 0.22 mg/L para F^- ; 205.2 ± 3.3 mg/L para Cl^- y 64.0 ± 1.4 mg/L para el SO_4^{2-} .

En un estudio reciente (Cousins, Johansson, Salter, Sha, & Scheringer, 2022), se advierte que los niveles de contaminación en la hidrosfera exceden lo recomendado para la seguridad humana. El agua está llena de polifluoroalquilados y perfluoroalquilados (PFAS, por sus siglas en inglés). Los polifluoroalquilados y perfluoroalquilados se producen desde 1948, son compuestos indestructibles que repelen el agua, la grasa y la suciedad, se utilizan en la ropa de lluvia y sartenes, por mencionar algunos ejemplos. Son altamente fluorados y al descomponerse se transforman en sustancias con una composición química similar y son extremadamente difíciles de eliminar del ambiente, sus consecuencias en los seres humanos son terribles, provocan problemas de salud como debilitación del sistema inmune



e incluso cáncer. y de acuerdo a la investigación, el ciclo de PFAS en la hidrósfera del planeta significa que los niveles de PFAS en el agua de lluvia serán prácticamente irreversibles.

(Bolaños, y otros, 2019) recomiendan el monitoreo constante del agua de lluvia, con el fin de contar con mayores datos sobre la influencia de fuentes de contaminación naturales y antropogénicas en ecosistemas naturales. También indican la necesidad de analizar una mayor cantidad de muestras, así como de realizar los periodos de muestreo más extensos y que el análisis sea de al menos dos años. Además, mencionan que un mayor control y seguimiento de la composición fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla es fundamental para el establecimiento de relaciones entre esta y las emisiones antropogénicas y naturales, así como para verificar la influencia de los contaminantes atmosféricos en los patrones de lluvia y sus efectos en el agua de consumo humano y la flora y la fauna de los ecosistemas naturales.

3.3. Equipos de monitoreo

En la literatura se han encontrado estudios e investigaciones recientes en el diseño y desarrollo de dispositivos para monitorear la calidad fisicoquímica del agua en cuerpos de agua, utilizando microcontroladores y sensores de bajo costo en su creación. Estos dispositivos incorporan los conceptos de tiempo real, bajo costo, IoT y Big Data, los cuales se relacionan al proyecto que se piensa desarrollar.

En 2013 Rao y colaboradores en Parkville Australia, diseñaron e implementaron un sistema de sensores de la fisicoquímica del agua de bajo costo e inalámbrico. Los parámetros que analizó fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial de reducción de oxígeno. La información era enviada a un ordenador, donde se procesaba y se enviaba a una base de datos SQL (Structured Query Language “Lenguaje de consulta estructurado”). Sus resultados mostraron que, con la calibración adecuada, se podría considerar como un sistema de monitoreo confiable (Rao, y otros, 2013).

En 2014 Cloete y colaboradores en Pretoria Sudáfrica, diseñaron y desarrollaron un sistema de sensores inteligentes para el monitoreo del agua en tiempo real capaz de medir parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua, como el caudal, temperatura, pH, conductividad y potencial de reducción de oxidación. Todos los datos de los sensores, los procesa, analiza y transmite de forma inalámbrica a través de la red Wi-Fi, notificando al usuario en tiempo real y emitiendo alertas cuando los parámetros de calidad del agua alcanzan niveles inseguros (Cloete, Malekian, & Nair, 2014).

En 2015 Vijayakumar y Ramya en Namakkal India, diseñaron y desarrollaron un dispositivo de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real en el entorno de IoT, el sistema constó de varios sensores que se utilizaron para medir parámetros físicos y químicos del agua como: temperatura, pH, turbidez, conductividad y oxígeno disuelto. Los datos son enviados al usuario a través de la red Wi-Fi. El monitoreo lo desarrollaron para monitorear la calidad del agua en el sistema de abastecimiento de su ciudad (Vijayakumar & Ramya, 2015).



En 2018 Oelen y colaboradores en Ámsterdam, Países Bajos, desarrollaron un dispositivo de medición de la calidad del agua de bajo costo diseñado para operar en el contexto de África rural, los parámetros a medir fueron: conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, temperatura y turbidez. El dispositivo funciona con un panel solar, cuenta con una pantalla LCD para mostrar los parámetros en el momento y los parámetros medidos los envía a un servidor a través de la red GPRS. Adicionalmente desarrollaron una interfaz en línea amigable para el usuario, que muestra los datos que el dispositivo ha enviado al servidor (Oelen, van Aart, & de Boer, 2018).

Eskin y colaboradores en el año de 2019 en Estambul Turquía, desarrollaron un dispositivo para el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real de un lago artificial ensamblando una plataforma de código abierto basada en Arduino a partir de sensores y controladores disponibles comercialmente. El sistema de análisis de agua funcionaba con una batería de 9V y tenía la capacidad de medir la turbidez, la acidez y la temperatura del agua en el lugar en tiempo real, los datos eran enviados al usuario a través de un módulo bluetooth (Eskin, y otros, 2019).

En 2019, en New Jersey, Malhorta y colaboradores, desarrollaron un equipo de monitoreo de algunos parámetros de calidad del agua (temperatura, sólidos disueltos totales, pH y turbidez) donde emplearon sensores de bajo costo y un microcontrolador de Arduino, y además emplearon la impresión 3D para integrar los circuitos en una estructura sólida (Malhotra, y otros, 2019).

Chowdury y colaboradores durante 2019 en Chittagong Bangladesh, proponen un sistema de monitoreo de la calidad del agua de un río en tiempo real basado en IoT utilizando redes de sensores inalámbricos con bajo consumo de energía, bajo costo y alta precisión de detección. Este sistema puede recolectar varios parámetros del agua, como pH, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad y temperatura. Los datos recopilados eran enviados a través de la red Wi-Fi a una base de datos y a un servidor web, donde el usuario podría consultarla en tiempo real, y cuando algún valor adquirido está por encima del valor del umbral, se envía al usuario una alerta automática por SMS (Chowdury, y otros, 2019).

En Brunei Darussalam en 2021, Hong y colaboradores investigaron la viabilidad de implementar un sistema de sensores basado en Arduino para el monitoreo de la calidad del agua de un río. Se empleó un prototipo simple que constaba de un microcontrolador y múltiples sensores conectados para realizar pruebas semanales en el sitio en múltiples intervalos diarios. Se encontró que el sistema funciona de manera confiable, pero depende de la asistencia humana y es propenso a imprecisiones en los datos (Hong, y otros, 2021).

Finalmente, en la ciudad de Morelia Michoacán, México, se desarrolló un sistema de monitoreo de las variables meteorológicas de la ciudad, este sistema está conformado por estaciones meteorológicas construidas con microcontroladores y sensores de bajo costo a través de la plataforma de Arduino, el monitoreo se realiza en tiempo real, la información captada por las estaciones es enviada a internet a través de la red Wi-Fi al servidor de ThingSpeak, el cual permite la visualización y descarga de la información temporalmente



accediendo a través de la red de internet desde un ordenador o un teléfono inteligente (Rodríguez Licea, 2020).

En México se tiene la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, el cual es llevado por la Comisión Nacional del Agua, donde se monitorean los principales cuerpos de agua del país. La red está constituida por cuerpos de agua lóticos, lénticos, costeros y subterráneos. Se incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de acuerdo con el tipo de cuerpo de agua. La información se encuentra integrada en un solo archivo y clasificada por tipo de cuerpo de agua y por estado. En 2020 se contaba con 5,034 sitios de monitoreo de la calidad del agua operados por la CONAGUA en todo el país. (CONAGUA, 2021).

Así mismo, también se han encontrado otras plataformas orientadas en el diseño de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia de las que destacan las siguientes: Tankulator, a la que podríamos describir como una calculadora para la captación de agua de lluvia en línea, que puede ayudar a planificar un nuevo depósito de agua de lluvia o a mejorar el rendimiento de un depósito existente. El Tankulator ha sido desarrollado por la Alternative Technology Association, la principal organización sin fines de lucro de Australia que promueve soluciones sostenibles para el hogar (Alternative Technology Association, 2022). O la Plataforma SCALL Chile donde se presenta un manual para el diseño de SCALL y su aplicación (Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2022).

Estas plataformas permiten la estimación del tamaño de área de captura o el volumen de un estanque para una obra de captación pluvial, sin embargo, tienen la desventaja de solo aceptar datos climatológicos locales del país de origen o requerir que el propio usuario provea los datos de su región.

Para el caso de Morelia, aún no se cuenta con una plataforma como las mencionadas, por ello, se busca integrar una herramienta tecnológica que facilite el diseño de obras de captación, que esté avalada por todos los lineamientos técnicos para un diseño y construcción óptima.

3.3. Infraestructura del monitoreo de variables meteorológicas de Morelia

Morelia cuenta con una infraestructura de monitoreo de variables meteorológicas por tres distintos sistemas: Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's), OOAPAS y CLICOM.

En el caso de las EMA's, las variables meteorológicas que monitorea son la temperatura del aire en grados Celsius (°C), la precipitación en milímetros (mm), la humedad relativa expresada en porcentaje (%), la presión atmosférica en Pascales (hPa), la radiación solar en vatios por metro cuadrado (W/m^2), la dirección del viento expresada en grados sexagesimales, la rapidez del viento en kilómetros por hora (km/h), la dirección de la ráfaga también expresada en grados sexagesimales y la rapidez de ráfaga expresada en km/h. Actualmente se cuenta con una estación en la ciudad de Morelia, con registros de información cada 10 minutos (CONAGUA, 2021).



Las variables que son registradas en las estaciones meteorológicas de OOAPAS son: la temperatura expresada en grados Celsius y Fahrenheit (°F), la humedad relativa expresada en porcentaje, la temperatura de condensación en °C y °F, la dirección y velocidad del viento en km/h, cuentan con un barómetro que mide la presión atmosférica en mm, la precipitación en mm, donde también se hace una distinción de la lluvia en tiempo real, la lluvia acumulada del día, el total de la tormenta, y el total de la lluvia mensual y anual, también se indica la sensación térmica, el índice THW (Temperature + Humidity + Wind) y el índice de calor en °C y °F. Actualmente cuentan con 10 estaciones meteorológicas (Oficinas Centrales, Mirador Punhuato, Planta Potabilizadora de Santa María, Palacio Municipal, Protección Civil Municipal, OOAPAS Carrillo Puerto, Protección Civil Estatal, Tecnológico de Monterrey Campus Morelia, San Isidro Itzícuaró y Planta Potabilizadora La Mintzita). La información de las estaciones se actualiza cada 5 minutos, y su página Web tiene una actualización automática cada 2 minutos (OOAPAS, 2021).

Finalmente, las estaciones de CLICOM registran variables de Precipitación en mm mostrando la acumulada diaria, Evapotranspiración en mm mostrando la acumulada diaria, y Temperatura en °C, registrando únicamente la máxima y mínima diaria (CLICOM, 2021).

Adicionalmente, la ciudad de Morelia cuenta con un Sistema Automático de Información Hidrológica, el cual fue desarrollado por la necesidad de mostrar en tiempo real variables meteorológicas, contar con un sistema de alerta temprana cuando existen precipitación en exceso y además crear una base de datos histórica; toda esta información está abierta al público, y este sistema fue desarrollado con tecnología de bajo costo. Actualmente se cuenta con 12 Estaciones Meteorológicas Automáticas de Bajo Costo (EMABC), estas estaciones registran datos de intensidad de precipitación en milímetros por hora (mm/h), temperatura en °C y humedad relativa expresada en porcentaje, el monitoreo se lleva a cabo minuto a minuto, en la página la información se actualiza continuamente (Rodríguez Licea, Sistema Automático de Información Hidrológica del municipio de Morelia, 2021).

Tabla 5. Características de los sistemas de información de la zona de estudio Fuente: (Rodríguez Licea, Sistema Automático de Información Hidrológica de Morelia, 2020).

Característica	EMAS	OOAPAS	CLICOM	SAIH
Monitoreo en tiempo real	Sí	Sí	No	Sí
Generación de bases de datos históricas	Sí	No	Sí	Sí
Información disponible al público	Sí	Sí	Sí	Sí
Bajo costo	No	No	No	Sí
Uso de SIG	No	Sí	Sí	Sí
Alertas	No	No	No	Sí
Calidad del Agua	No	No	No	No

Las EMABC son eficientes, pero fueron creadas siguiendo la metodología del desarrollo de prototipos de (Stair & Reynolds, 2010), por lo que los prototipos están en constante



desarrollo, buscando siempre cumplir con las necesidades de los usuarios. Actualmente, ninguna estación meteorológica en México realiza muestreos de calidad del agua de lluvia, implementar este tipo de tecnología traería algunos beneficios, que van desde el aprovechamiento del agua pluvial, conocer el grado de contaminación antrópica del agua de lluvia, conocer el grado de contaminación antes y después de que las corrientes pluviales lleguen a los cuerpos de agua y, además, se podría crear un sistema de alerta para cuando se presente lluvia ácida en la ciudad.

4. JUSTIFICACIÓN

La calidad del agua de lluvia se ha convertido en un asunto de interés, ya que las emisiones de origen antropogénico se han incrementado, originando zonas urbanas con alto nivel de polución en el aire, contaminando la atmósfera con elementos como el dióxido de nitrógeno entre otros. En el capítulo 3.3. Calidad del agua de lluvia, se mencionan algunas investigaciones donde se examinó la calidad del agua de lluvia en diferentes partes del mundo, y (Bolaños, y otros, 2019) recomiendan el monitoreo de la calidad del agua de lluvia, con el fin de contar con mayores datos sobre la influencia de fuentes de contaminación naturales y antropogénicas.

Como tal es una buena práctica el monitorear la calidad del agua, para garantizar que es apta para consumo humano, el monitoreo actual de la calidad del agua a menudo se lleva a cabo en laboratorios tradicionales, por lo que habría que desarrollar un sistema automático de monitoreo en tiempo real de la calidad del agua de lluvia.

En este proyecto se desarrolló un sistema de medición de parámetros fisicoquímicos del agua de lluvia, empleando sensores de bajo costo, que utilizan software y hardware libres, dichos sensores están acoplados a una placa de Arduino y a un módulo ESP8266, para el análisis de la información recopilada por los sensores y la transmisión de la información de forma inalámbrica hacia una plataforma web, con el objetivo de realizar mediciones in situ y en tiempo real de la cantidad y calidad del agua de lluvia, de manera continua, lo que permite observar los cambios debido a la contaminación.

Actualmente existen fabricantes que prestan soluciones para este tipo de aplicaciones, pero la mayoría son costosas, por lo que no están al alcance de todos. A manera de ejemplo se puede citar el medidor portátil multiparamétrico de calidad del agua HI 9829 del fabricante Hanna Instruments, en sus diferentes modelos, los cuales miden y registran alrededor de 15 parámetros de calidad del agua y cuyo precio aproximado ronda los \$3,300.00 USD (Hanna Instruments, 2021).

Una versión más económica del medidor por parte del mismo fabricante es el HI 9811-5, el cual con una sola sonda mide pH, Conductividad, SDT y temperatura en un medio acuoso, con una buena precisión y cuyo costo aproximado de venta ronda los \$330.00 USD (Hanna Instruments, 2021). Este equipo cuenta con la medición de los parámetros in situ y muestra los valores medidos en una pantalla LCD, el medidor no cuenta con registro ni con envío de datos para su almacenamiento o monitoreo en tiempo real.

Se ha puesto en evidencia que el costo de los equipos para el monitoreo de la calidad del agua es bastante elevado incluso en su versión más económica, por lo que el desarrollo de un equipo de medición de la calidad del agua de lluvia en tiempo real y de bajo costo, contribuiría al monitoreo automático, de forma remota de algunos parámetros y ahorro de tiempo de captura y transcripción de datos.



5. HIPÓTESIS

Mediante el uso de un equipo con tecnología de bajo costo, será factible desarrollar un sistema de monitoreo confiable y eficiente para determinar el pH, los sólidos disueltos totales (SDT) y la turbidez del agua de lluvia en tiempo real y de forma remota.

6. OBJETIVO

6.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo con tecnología de bajo costo para conocer en tiempo real y de forma remota los parámetros de pH, sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez del agua de lluvia.

6.2. Objetivos específicos

- Establecer los sensores que serán empleados para monitorear la calidad del agua de lluvia.
- Desarrollar un prototipo que contenga un grupo de sensores para determinar algunos parámetros de la calidad del agua de lluvia.
- Calibrar los sensores del equipo de medición.
- Validar los sensores desarrollados contra los sensores comerciales realizando pruebas en el laboratorio.
- Desarrollar una base de datos para almacenar la información monitoreada en tiempo real.
- Desarrollar una interfaz web donde se pueda visualizar la información en tiempo real y de forma espacial.

7. METODOLOGÍA

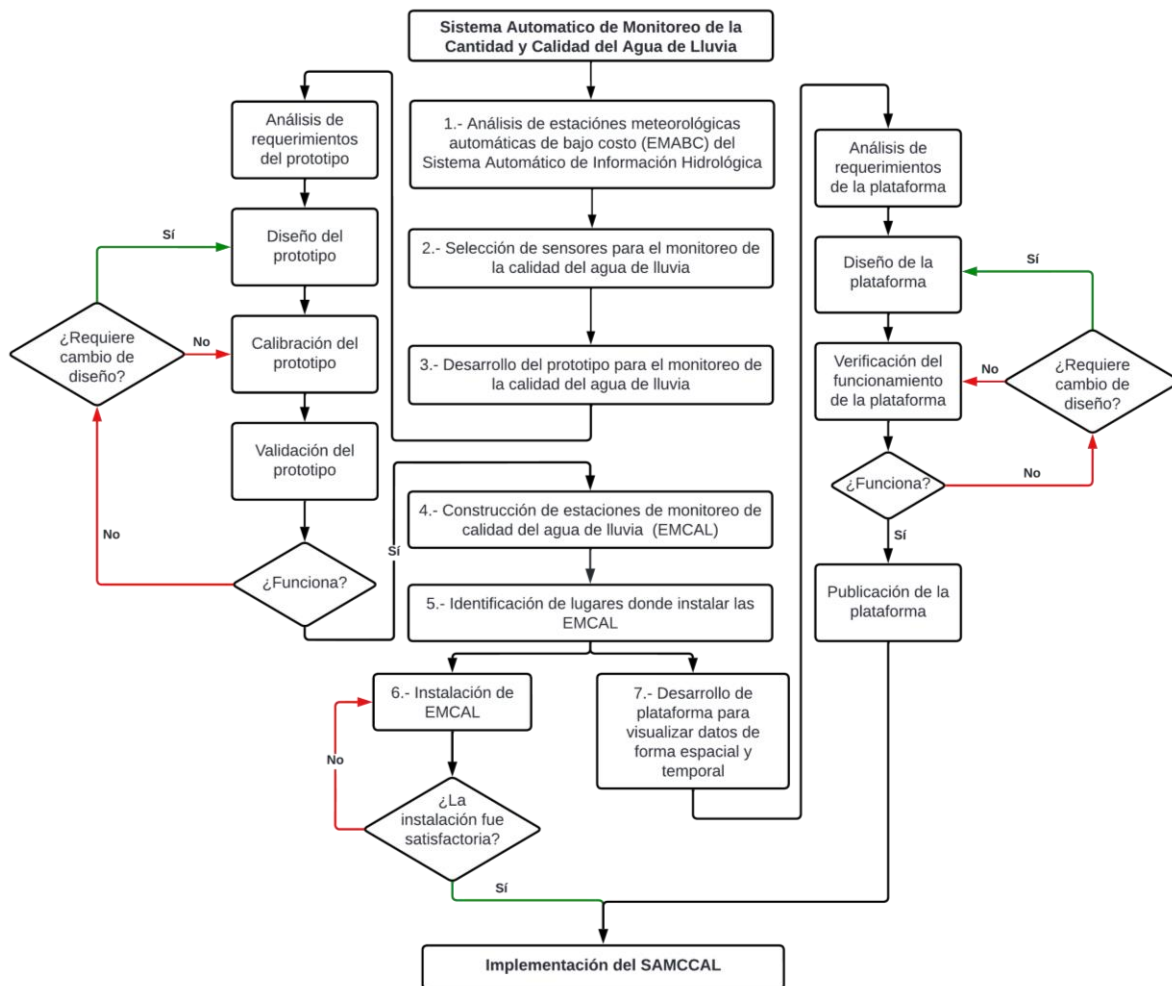


Figura 9. Metodología para el desarrollo del proyecto.

Análisis de estaciones meteorológicas automáticas de bajo costo (EMBC) del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH)

En este apartado, se localizan las EMBC del SAIH, se hace una inspección del estado actual de las estaciones y se analizan los componentes que las integran. Esto para determinar si se requerirá hacerles modificaciones o repararlas si es que no están funcionando.

Selección de sensores para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia

Cuando se habla de calidad del agua, existen diversas variables para ser medidas, a partir de las cuales se puede realizar una evaluación, pero también se debe considerar la practicidad de medir ciertas variables, para el caso de este proyecto, las mediciones de la calidad del agua que toman demasiado tiempo para establecer resultados precisos tuvieron que ser eliminadas de la consideración, la evaluación de factores biológicos, se redujo a la



medición de la turbidez como indicador cualitativo indirecto de riesgo de contaminación microbiológica ya que la turbidez refleja una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, niveles altos de turbidez pueden proteger a los microorganismos y estimular la proliferación de bacterias, por lo que puede ser indicio de contaminación de acuerdo a un trabajo desarrollado (Marcó, Azario, Metzler, & Garcia, 2004). También la contaminación por sustancias peligrosas disueltas se redujo a la medición de sólidos disueltos totales (SDT) la cual es mucho más simple, de forma indirecta, haciendo medición de la conductividad eléctrica (CE). Finalmente, el tercer aspecto a considerar fue la medición del pH, el cual es un indicador del grado de alcalinidad o acidez, que, para el caso del agua de lluvia, si esta tiene valores de pH bajos, puede provocar tallado en las superficies de contacto, manchas en las paredes, corrosión de metales e irritación de ojos y piel. Por otro lado, si el pH es alto, el agua de lluvia puede provocar incrustaciones en las superficies de contacto, así como también la irritación de ojos y piel.

En un trabajo desarrollado (Lambrou, Anastasiou, Panayiotou, & Polycarpou, 2014), se estableció que los parámetros del agua, como los niveles de nitrato, la concentración de cloro libre y el oxígeno disuelto, son demasiado costosos para monitorear y/o requieren mantenimiento y calibración frecuentes para mantener lecturas precisas durante largos períodos de tiempo. Lo cual no resulta factible para el sistema de monitoreo de la calidad del agua en tiempo real de bajo costo a largo plazo que se desarrollará en este trabajo.

Desarrollo del prototipo para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia

En el desarrollo del prototipo se analizaron los requerimientos para el prototipo y en base a ese análisis se diseñó el prototipo para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia.

Posteriormente, se calibran los sensores con soluciones estándares de calibración, y con ello se establece una relación entre el voltaje medido por los sensores y la magnitud del parámetro analizado.

Finalmente se valida que la información proporcionada por el prototipo desarrollado sea verdadera, si se cumple este aspecto, se ha terminado la etapa de desarrollo.

Construcción de estaciones de monitoreo de calidad del agua de lluvia

En este apartado se construyen prototipos similares a los desarrollados previamente, con la finalidad de ubicarlos en diferentes puntos de la ciudad de Morelia, para poder monitorear la calidad del agua de forma espacial y temporal. La construcción de estaciones de monitoreo de calidad del agua de lluvia se verá limitada por los costos de los sensores y microcontroladores.

Identificación de lugares donde se instalarán las estaciones

En esta parte, se identifican los puntos donde se ubicarán las estaciones de monitoreo de la calidad del agua de lluvia, para la selección de su ubicación se toma en cuenta las



distancias entre estaciones, y se comprueba de que el responsable de la estación se comprometa a estar al pendiente de su funcionamiento y le dé mantenimientos cuando se requieran.

Instalación de EMCAL

La instalación de las estaciones de monitoreo de calidad del agua de lluvia se hace de forma paralela al desarrollo del sitio web, la instalación consiste en conectar las EMCAL a las estaciones del Sistema Automático de Información Hidrológica, además de actualizar el código, para que la información se envíe al sitio desarrollado, la instalación de las estaciones debe ser adecuada, para que no se presenten fallos y se envíen datos erróneos al sitio web.

Desarrollo de plataforma para visualizar datos de forma espacial y temporal

En este apartado se desarrolla una plataforma web que nos permita almacenar la información de las estaciones y además les permita a los usuarios visualizar los datos en tiempo real y de forma espacial, a continuación, se listan las opciones consideradas para el desarrollo de la plataforma:

- I. **Análisis de requerimientos:** Para esta plataforma web, se desea mostrar de forma espacial en un mapa las estaciones de monitoreo, tanto las meteorológicas como las de calidad del agua con marcadores, para que el usuario pueda visualizarlas y que, al interactuar con los marcadores, se muestre la información más reciente de las mismas.

- II. **Arquitectura y tecnología:** Para el desarrollo de esta plataforma se optó por contratar los servicios de Hostinger un proveedor de hosting (alojamiento de información que es accesible a través de internet) con esto, el servidor siempre se encontrará disponible, se podrá modificar la información de la plataforma de forma remota y se ahorrará tiempo y dinero en el mantenimiento de un servidor físico, por otro lado, la única desventaja es que, al ser un servicio de paga, habrá que estar al corriente con los pagos, de lo contrario se podría perder la información. La plataforma no requiere de demasiadas condiciones, por lo que se eligió el servicio de Hosting Sencillo, el cual proporciona: 1 sitio web, 50GB para almacenamiento en una unidad de estado sólido, 100GB de ancho de banda y 2 bases de datos.
En cuanto a la tecnología web, se considera desarrollar un sitio web dinámico que muestre información en tiempo real, se hará uso de tecnologías web básicas como: html, php, JavaScript y css; y el gestor de base de datos que se usará es My SQL. Se tomará como base una plantilla web gratuita de Bootstrap (SB Admin 2) (Start Bootstrap, 2014) que es un framework front-end utilizado para desarrollar aplicaciones web y sitios mobile first, o sea con un layout que se adapta a la pantalla del dispositivo utilizado por el usuario (Rockcontent, 2020).



- III. Diseño de la estructura lógica y física del sitio:** La estructura de la plataforma estará conformado de la siguiente manera: la página principal del sitio será la que contenga el mapa con las estaciones de monitoreo ubicadas espacialmente, se contará con un apartado en el cual el usuario pueda seleccionar los parámetros que desea consultar en tiempo real, otro apartado donde se pueda descargar datos de un periodo de tiempo de una o varias estaciones de monitoreo, otro apartado donde el usuario pueda consultar un dato registrado en una fecha y hora específica, y finalmente, se añadirán los apartados de Equipo, Contacto y Diseño SCALL; donde se mostrarán los datos del equipo de trabajo en el desarrollo de este proyecto; la información de contacto para que se envíe un email con dudas y sugerencias; y una plataforma donde el usuario pueda diseñar un sistema de captación de agua de lluvia.
- IV. Creación de contenidos:** el contenido de la plataforma será gráfico en su mayoría, los textos más largos se encontrarán en las pestañas de Equipo, Contacto y Diseño SCALL, en el resto solo se encontrarán pequeños textos con indicaciones para el usuario o información de los indicadores.
- V. Diseño gráfico:** Para los colores se seleccionaron varias tonalidades de blanco, azul, gris, negro y verde. Blanco para la barra de navegación, fondo de las páginas y ventanas emergentes; azul para algunos textos, algunos botones de selección, los indicadores meteorológicos y para las gráficas en tiempo real; gris para algunos textos, los marcadores de las estaciones, los iconos de los indicadores y los botones de regresar; negro para la mayoría de los textos; y verde para los indicadores de calidad del agua y algunos textos. La tipografía utilizada será la que viene por defecto en la plantilla de Bootstrap y los tamaños serán adaptativos de acuerdo al dispositivo que abra el sitio. Los iconos de los indicadores se tomaron de la plataforma Font Awesome (Font Awesome, 2021), la cual provee de iconos que se pueden cargar en la página web de forma gratuita.
- VI. Creación de las páginas estáticas:** Las páginas estáticas de la plataforma son las correspondientes a Equipo, Contacto y la página de Diseño SCALL. Estas páginas no presentaran cambios en función de la base de datos.
- VII. Creación de las páginas dinámicas:** La página dinámica de la plataforma es la correspondiente a la página de inicio, donde se muestran los marcadores de las estaciones en el mapa, estos indicadores cambian de color en función de la intensidad de precipitación y la información de las magnitudes de los indicadores también se modifica en tiempo real.
- VIII. Verificación del funcionamiento del sitio:** Para la verificación del funcionamiento del sitio, se probó la conexión de la página con la base de datos y se observó que se extraía los datos más recientes. Posteriormente se comprobó que los enlaces



colocados dentro del sitio se direccionarán al sitio correcto. Finalmente se hizo la prueba de abrir el sitio en diferentes navegadores y diferentes dispositivos, y se comprobó que la página cargará sin fallos y que el contenido se adaptará al tamaño de la pantalla; también se probó el tiempo de carga del sitio.

- IX. Puesta en marcha:** Finalmente, después de verificar el funcionamiento del sitio de forma local, el sitio se publica en el dominio web, para que esté al acceso de algunos usuarios (pertenecientes al equipo de monitoreo del SAIH).

Implementación del SAMCCAL

Finalmente se hace público el sitio, para que el público en general pueda consultar tanto la información meteorológica como la de calidad del agua de lluvia de forma remota.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1. Análisis de estaciones meteorológicas automáticas de bajo costo del Sistema Automático de Información Hidrológica

En un principio, se contaba únicamente con 6 estaciones meteorológicas de bajo costo (EMBC) en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), y estas no se encontraban en las condiciones óptimas, por lo que fue necesario mejorar las condiciones en las que estaban. Posteriormente se construyeron 6 estaciones más, para tener un total de 12 EMBC, su ubicación se muestra en la *Figura 10*, estos dispositivos se alimentan a través de la red eléctrica con un adaptador de corriente de 9v, y están compuestos por dos sensores, un sensor WH-SP-RG *Figura 11* (este sensor funciona como un pluviómetro de cubetas basculantes) y un sensor DHT22 *Figura 12* (sensor que mide la temperatura y humedad relativa); estos sensores se conectan a una placa NodeMCU ESP8266, la cual recibe la información, la procesa y posteriormente la transmite a través de la red Wi-Fi a la plataforma de Thingspeak, los datos se pueden visualizar en tiempo real en el sitio web: <https://www.saihmorelia.com>. Las variables meteorológicas que registran estas estaciones son 4 (Precipitación, Intensidad de precipitación, Temperatura y Humedad relativa).

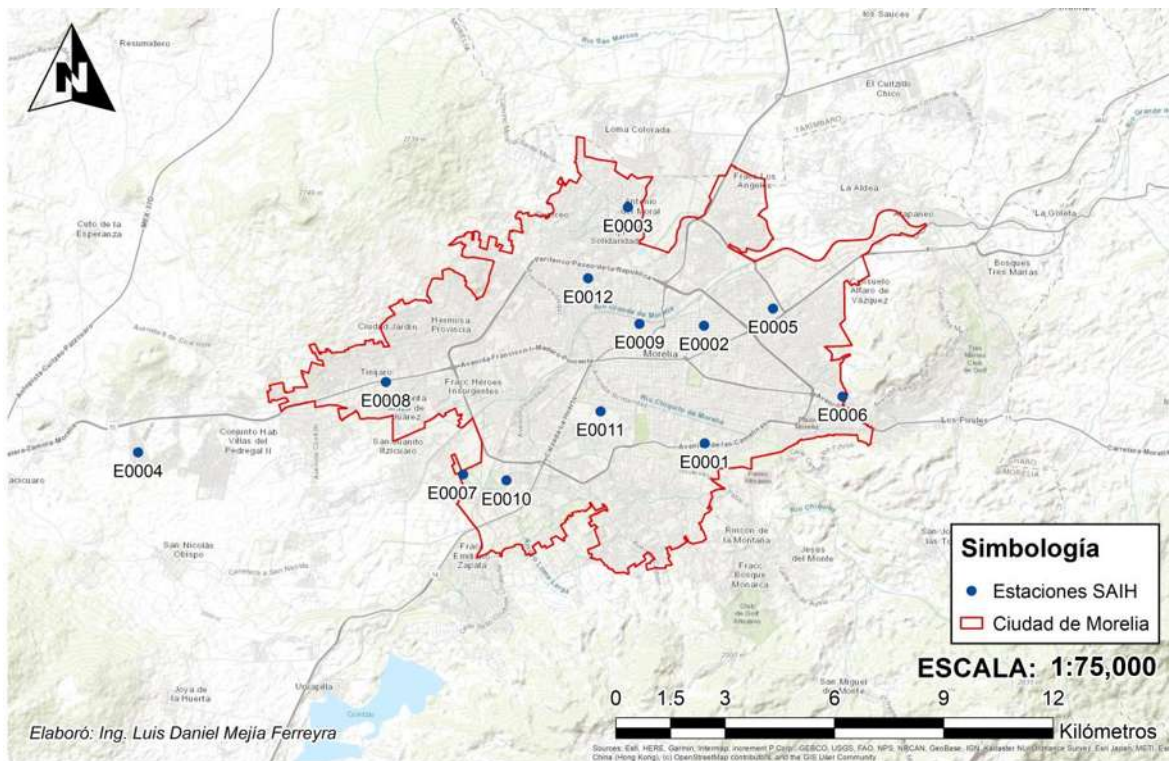


Figura 10. Estaciones meteorológicas automáticas de bajo costo del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) 2022, elaboración propia.





Figura 11. Pluviómetro de balancín WH-SP-RG MISOL de las estaciones del SAIH.

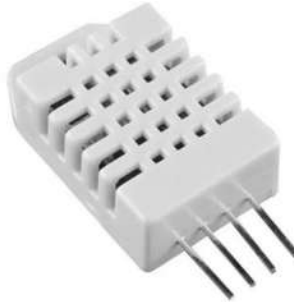


Figura 12. Sensor DHT22 de las estaciones del SAIH.

De estas estaciones se puede aprovechar el sensor de precipitación, para conocer la cantidad de agua de lluvia en tiempo real.

Adicionalmente, se desarrolló un pluviómetro de cubetas basculantes de bajo costo, tomando como base un modelo 3D (Samshad, 2021) cómo se observa en la *Figura 13* diseñado en un software de diseño asistido por computadora obtenido de Thingiverse (Thingiverse, 2022), una plataforma que permite la descarga gratuita de una gran variedad de archivos para impresión 3D.

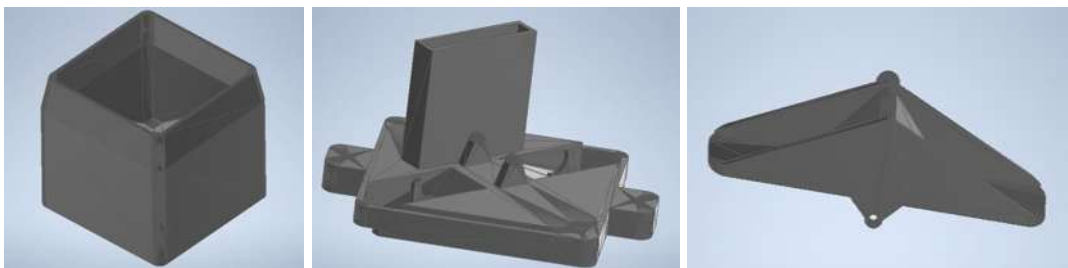


Figura 13. Modelo 3D de los elementos del pluviómetro de cubetas basculantes.

Adicionalmente se diseñó la PCB (Printed Circuit Board, en español Placa de Circuito Impreso) en la cual se tiene que soldar un sensor magnetico Reed Switch de 12mm como se observa en la *Figura 14*, cada extremo del sensor se conecta a un cable, que son los que se conectarían a la NodeMCU de la EMBC. El desarrollo de este sensor tiene la finalidad de ampliar el número de EMBC en el SAIH, pero como este proyecto requiere de más atenciones, quedó abierta para desarrollarse en una línea de investigación futura.

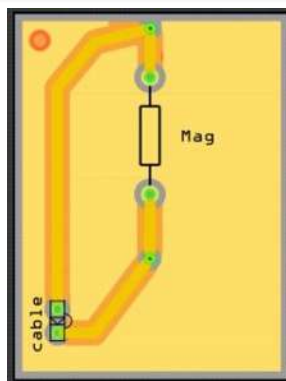


Figura 14. PCB Pluviómetro de bajo costo.

8.2. Selección de sensores para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia

Después de hacer una revisión bibliográfica donde se revisaron trabajos similares se encontró que la mayoría de los trabajos consideraba 4 parámetros, los cuales son: pH, sólidos disueltos totales, turbidez y temperatura, se buscaron sensores que permitieran monitorear esos parámetros de calidad del agua en el mercado, se encontraron los sensores que se muestran en la *Tabla 6*, donde se muestra su modelo, rango de medición, precisión, temperatura de funcionamiento y sus precios aproximados en pesos mexicanos y dólares estadounidenses:

Tabla 6. Especificaciones de sensores de calidad del agua seleccionados para el diseño del prototipo.

Sensor	Modelo	Voltaje de entrada	Rango de medición	Precisión de medición	Temperatura funcionamiento	Precio (MXN)	Precio (USD)
Sensor Analógico de SDT y CE	TDS Meter v1	3.3 ~ 5.5V	0 ~ 1000mg/l	± 10% (25 ° C)	0 °C ~ 55 °C	\$650.00	\$32.50
Sensor Analógico de turbidez	SEN0189	5V	0 ~ 1000NTU	± 10%	5 °C ~ 90 °C	\$690.00	\$34.50
Sensor de pH	PH-4502C	5V	0 ~ 14	± 10%	0°C ~ 80°C	\$613.00	\$30.65
Sensor de Temperatura en Agua	DS18B20	3.0 ~ 5.5V	-10°C ~ +85°C	±0.5°C	-55°C ~ +125°C	\$55.00	\$2.75

Para comprobar que la selección de parámetros fue adecuada y que los sensores serían capaces de medirlos, se hizo un estudio del tipo exploratorio de la calidad del agua de lluvia captada durante 16 días, en algunos puntos de la ciudad de Morelia, tomando como referencia la norma de calidad del agua potable de México (NOM-127-SSA1-2021).

Los puntos que se seleccionaron para el estudio fueron 4, estos se eligieron debido a que se tenía fácil acceso a ellos, además que se contaba con un responsable que se encargó de verificar que las muestras no se contaminaran. La captación del agua se hizo de forma directa, es decir que el agua recolectada cayó directamente, sin tocar antes alguna otra

superficie, tal como lo indica la metodología de muestreo de agua de lluvia de la USEPA (que fue la que se siguió debido a que en México no se cuenta con una metodología para el muestreo de agua de lluvia) (USEPA, 1994). En la *Figura 15* se pueden observar espacialmente los puntos de muestreo que se seleccionaron y en la *Tabla 7* se presenta el registro de las lluvias captadas.

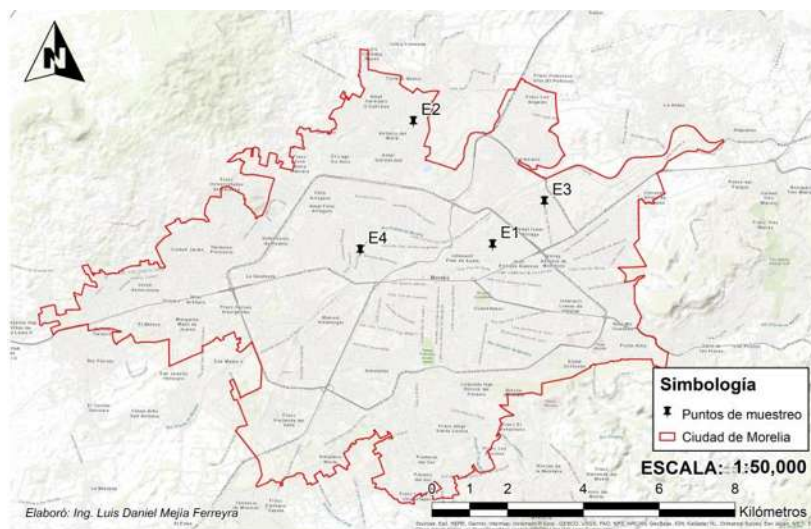


Figura 15. Ubicación de los puntos de muestreo, elaboración propia.

Tabla 7. Registro de lluvias captadas, elaboración propia.

Fecha	Hora inicio	Hora final
7/1/2021	19:00	19:40
7/2/2021	18:00	18:30
7/7/2021	13:30	13:50
7/10/2021	En la noche	
7/11/2021	17:10	17:15
	19:10	19:20
	20:20	20:40
7/12/2021	14:35	17:10
7/13/2021	17:40	20:20
7/14/2021	21:50	23:00
7/16/2021	21:40	23:30
7/17/2021	17:10	18:20

Los parámetros de calidad del agua se obtuvieron siguiendo las normas correspondientes a cada uno de los cuatro parámetros: temperatura (SINEC, 2013), pH (SINEC, 2016), turbidez (SINEC, 2001) y conductividad eléctrica (SINEC, 2000).

En la *Tabla 8* se muestran los resultados de los análisis, comparándolos con los valores tolerados por la NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 8. Resultados de los análisis de las muestras, elaboración propia.

Parámetro	Unidad	NOM-127	E1	E2	E3	E4
Temperatura	°C	-	19	20	20	18
pH	pH	6.5-8.5	7.25	8.13	7.22	7.05
Turbidez	NTU	5	75	105	117	50
CE	μS/cm	-	22.89	40.52	39.37	18.75

Se puede observar que el pH de las muestras se encuentra dentro del rango permitido por la norma de calidad del agua, en cambio la turbidez, se encuentra fuera de la norma. Por otro lado, la temperatura y la conductividad eléctrica no se encuentran normados por la NOM-127-SSA1-2021.

8.3. Desarrollo del prototipo para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia

8.3.1. Análisis de los requerimientos del prototipo

En el capítulo 2.8. Diseño, se muestra una lista con las opciones de diseño para prototipos (Pitula, Dysart-Gale, & Radhakrishnan, 2010), que después de haber analizado el estado actual de las EMBC y de hacer una revisión bibliográfica, se seleccionaron las siguientes opciones:

- I. **Fuente de alimentación:** el prototipo se conectará a las estaciones del SAIH, por lo que la alimentación será la misma, es decir a través de la red eléctrica.
- II. **Conectividad:** las estaciones del SAIH se conectan a internet de forma inalámbrica a través de Wi-Fi, por lo que para el prototipo desarrollado será igual.
- III. **Visualización:** las estaciones del SAIH muestran su información en tiempo real en una página web utilizando widgets de la plataforma de Thingspeak, la cual en su forma gratuita solo permite almacenar un mes de información, después borra los registros, por lo que para este proyecto se opta por el desarrollo de una base de datos en un host.
- IV. **Condiciones de funcionamiento:** los sensores utilizados para determinar la calidad del agua cuentan con un circuito y una sonda, las sondas son a prueba de agua, pero los circuitos no, para no dejarlos expuestos a la intemperie, se diseñó una carcasa que almacena los circuitos, deja expuestas a las sondas, permite que se almacene agua de lluvia y que ésta se vaya renovando conforme llueva.

8.3.2. Diseño del prototipo

Se empleó una placa de Arduino NANO como microcontrolador, los detalles de las conexiones de los sensores con la placa de Arduino se pueden ver en el diagrama del circuito en el ANEXO 2. *Diagrama de conexiones*, en la *Figura 16* se muestra la PCB donde se podían



montar la placa de Arduino Nano y los sensores; para conectar el dispositivo a internet, se usa la placa NodeMCU ESP8266 con la que ya cuentan las estaciones del SAIH. Mediante un protocolo de comunicación serial, el Arduino NANO envía la información a la NodeMCU y la placa NodeMCU mediante un protocolo de comunicación HTTP, transmite los datos a la base de datos del servidor.

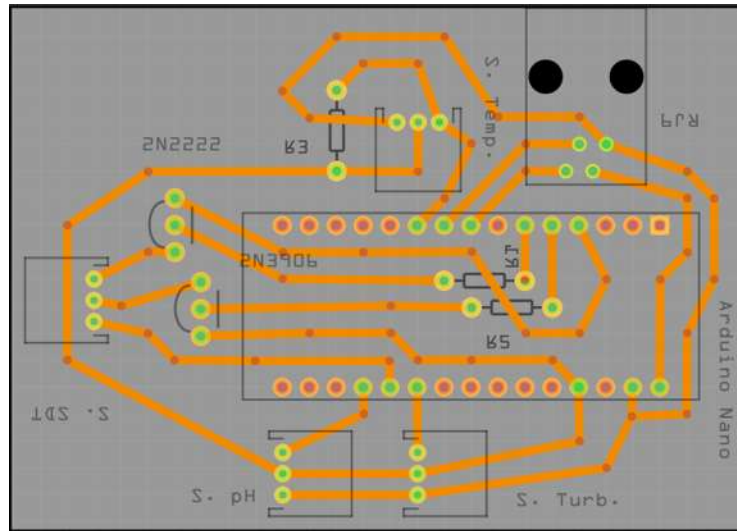


Figura 16. PCB diseñada para montar el microcontrolador y los sensores.

La Estación de Monitoreo de Calidad del Agua (EMCAL) con comunicación Wifi y conexión al servidor web, se desarrolló bajo la arquitectura que se muestra en la *Figura 17*.

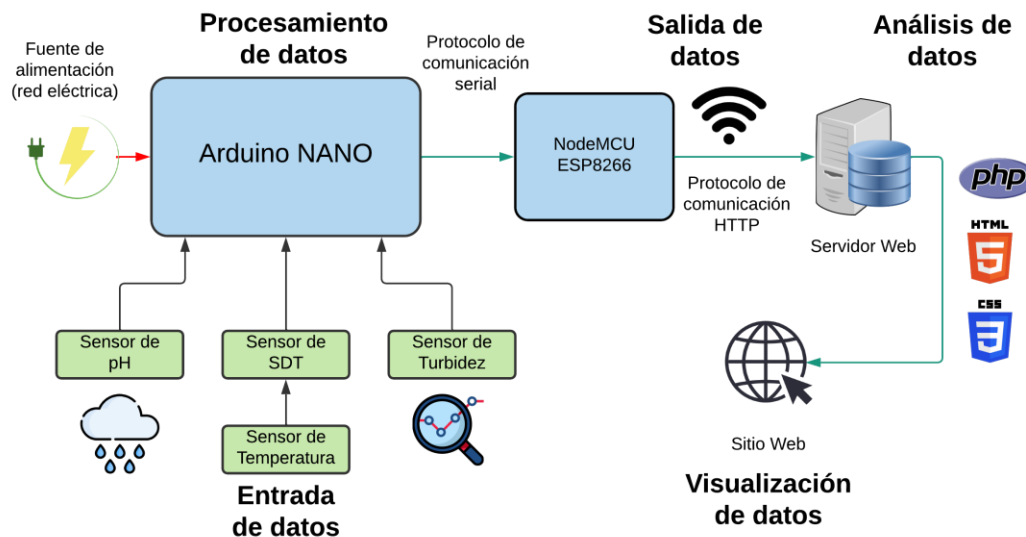


Figura 17. Arquitectura del prototipo de monitoreo de la calidad del agua de lluvia, elaboración propia.

Para proteger los circuitos de la intemperie y retener agua para que esta pueda ser analizada por los sensores, se diseñó una carcasa en Fusion360, que es una herramienta de

diseño CAD (Diseño Asistido por Computadora, por sus siglas en inglés) en 3D de Autodesk (AUTODESK, 2022) se empleó su licencia libre (para hobbies).

En la *Figura 18* se muestra en isométrico el modelo 3D que se diseñó, el diseño está compuesto de una caja donde se guardan los circuitos y solo deja pasar los cables de las sondas, dicha caja se cierra con una tapa para proteger a los circuitos, los cables salen por las pequeñas cejas, las sondas se insertan en los orificios circulares de la parte baja, el agua es captada por la parte descubierta y almacenada momentáneamente, ya que se tiene un desfogue para vaciar el agua cuando se llegue a un determinado nivel, adicionalmente se le integró un orificio que puede taparse y destaparse con un tornillo, esto para desfogar cuando se necesite limpiar o vaciar por completo.

Se empleó filamento PLA (ácido poliláctico), para la impresión del modelo diseñado, a la impresora empleada fue una Ender 3 Pro como se muestra en la *Figura 19*, la cual es de las ideales para principiantes en impresión 3D y no es muy costosa. El modelo final impreso, con los circuitos y sondas de los sensores insertados se muestra en la *Figura 20*.

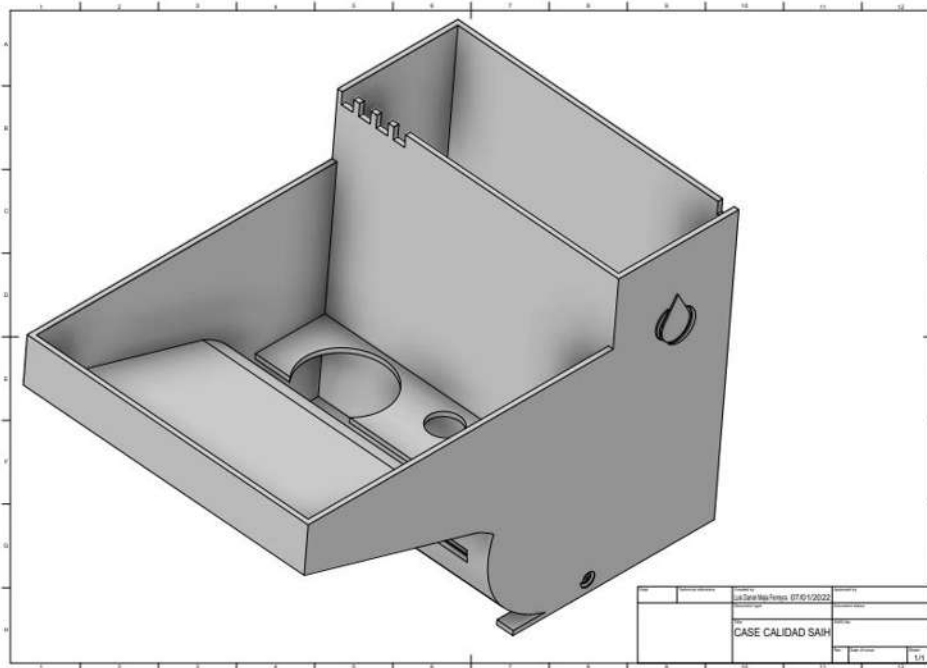


Figura 18. Modelo 3D donde se integran los circuitos y los sensores de calidad del agua de lluvia.

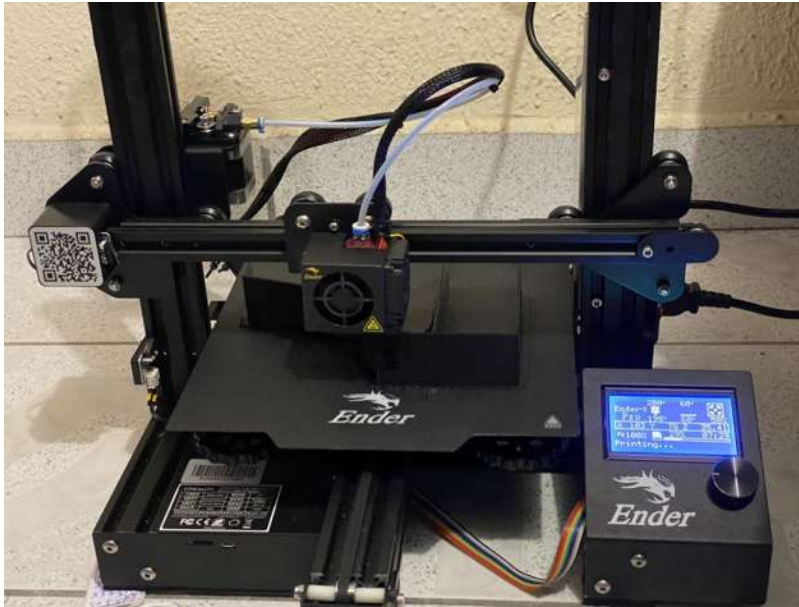


Figura 19. Uso de la impresora Ender 3 Pro para la impresión 3D de la carcasa que integra los circuitos.



Figura 20. Modelo 3D donde se integran los circuitos de los sensores de calidad del agua de lluvia.

8.3.3. Calibración del prototipo

Calibración del pluviómetro

Como se mencionó anteriormente, en el SAIH se utiliza un pluviómetro de cubetas basculantes WH-SP-RG MISOL ,para medir la cantidad de precipitación, en la que cada movimiento de las cubetas representa una lámina de precipitación.

Es sabido que un milímetro de precipitación equivale a un litro de agua en un metro cuadrado, por lo que para la calibración se necesita saber el volumen de agua que provoca un movimiento de las cubetas basculantes (o balancín) y también determinar el área de captación, para establecer una relación, como se expresa en la *Ecuación 2*.

$$Lámina (mm) = \frac{Vol(l)}{Ac (m^2)}$$

Ecuación 2. Relación entre volumen captado y área de captación para obtener la lámina de precipitación.

El área se determinó multiplicando las dimensiones del pluviómetro, dado que tiene forma rectangular, se determinó el largo y ancho con un vernier. Para determinar el volumen, se empleó una jeringa de 10 ml y mediante goteo se determinó el volumen necesario para que se moviera el balancín, se realizaron 100 repeticiones para obtener un valor promedio del volumen, los datos obtenidos se muestran en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Resultados de la calibración del pluviómetro WH-SP-RG.

Pluviómetro WH-SP-RG MISOL		
Largo	0.10910	m
Ancho	0.04920	m
Área	0.00537	m ²
Vol. Prom.	0.00167	l
Lámina	0.31	mm

Calibración del sensor de pH

El sensor de pH se calibró probándolo con tres soluciones buffer de pH 4, 7 y 10 tal como se establece en la NMX-AA-008-SCFI-2016 (SINEC, 2016), el proceso de medición consistió en limpiar la sonda del sensor con agua destilada, secarla con un pañuelo desechable y sumergirla dentro de solución, se tomaron unos minutos en lo que se estabilizaba la medición, y en cuanto se estabilizó se registró el valor del voltaje, los resultados se muestran en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Valores de voltaje relacionados con el pH.

pH	Voltaje (V)	Voltaje Promedio (V)
4	3.0365, 3.0356, 3.0358, 3.0351, 3.0361, 3.0359, 3.0355, 3.0352, 3.0352, 3.0357	3.03566
7	2.5299, 2.5296, 2.5295, 2.5303, 2.5297, 2.5287, 2.5291, 2.5296, 2.5296, 2.5288	2.52948
10	2.0352, 2.0361, 2.0359, 2.0355, 2.0352, 2.0353, 2.0348, 2.0351, 2.0357, 2.0351	2.03539

Estos valores se graficaron y como la relación entre el pH y el voltaje es lineal gracias al transductor que posee el sensor, se obtuvo la recta de mejor ajuste; que es la mejor aproximación al conjunto de datos, esta se muestra en la *Figura 21* y la ecuación que describe la recta se muestra en la *Ecuación 3*.



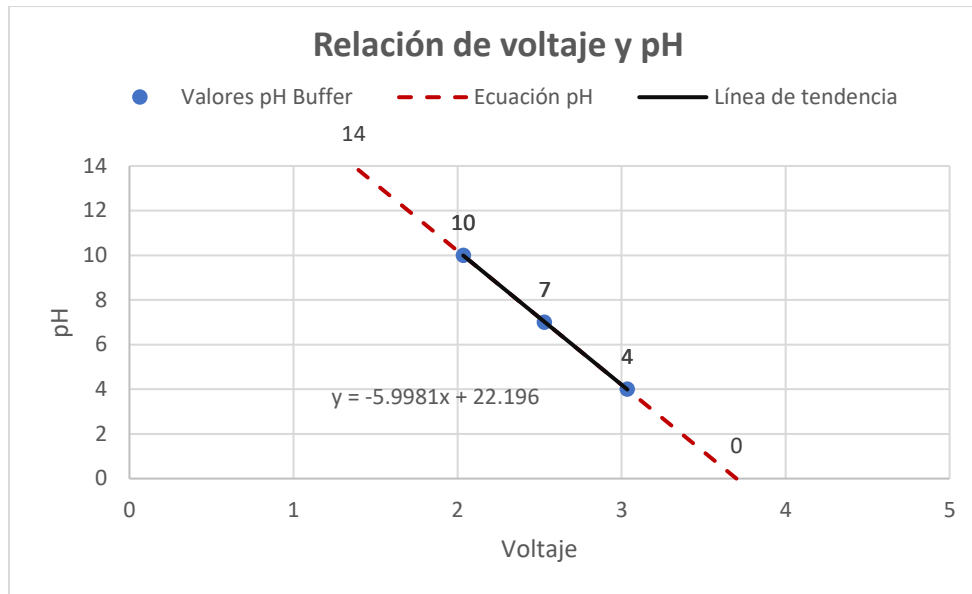


Figura 21. Relación entre el voltaje y el pH con recta de mejor ajuste.

$$pH = -5.9981V + 22.196$$

Ecuación 3. Ecuación que determina el pH en función del voltaje.

Esa ecuación es válida para voltajes mayores a 1.3664 y menores de 3.7005, para los voltajes que excedan ese rango, les corresponden valores de pH de 14 y cero respectivamente.



Figura 22. Soluciones buffer de pH 4, 7 y 10, empleadas para la calibración del sensor de pH, elaboración propia.

Calibración del sensor de SDT

El sensor de SDT funciona empleando la *Ecuación 5* la cual describe la relación entre el voltaje y la conductividad eléctrica, dicha ecuación se encuentra en el *Anexo A1.2. Sensor de sólidos disueltos totales* y dentro de ese capítulo se especifica que la conductividad

eléctrica puede proporcionar una métrica fiable de la concentración de sólidos disueltos totales en el agua, para su calibración se empleó una solución estándar de conductividad de NaCl con una concentración de 692 mg/l la cual indicaba una conductividad de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C tal como se especifica en la NMX-AA-093-SCFI-2000 (SINEC, 2000) .

A diferencia del sensor de pH, el sensor de SDT requiere de una sonda de temperatura para calibrar el voltaje, el proceso de medición consistió en limpiar las sondas de SDT y temperatura con agua desionizada, se secaron con un pañuelo desechable y se introdujeron dentro de la solución, se esperó a que se estabilizara la lectura y después se registraron los valores del voltaje, los resultados se muestran en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Valores de conductividad eléctrica medidos con el estándar de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

T °C	Voltaje (V)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
23.94	1.7427	1423.26267
23.94	1.7365	1415.95613
23.93	1.7369	1416.37345
23.93	1.7410	1421.20367
23.95	1.7381	1417.89124
23.94	1.7377	1417.36766
23.96	1.7394	1419.35673
23.92	1.7361	1415.49705
23.94	1.7345	1413.6064
23.95	1.7360	1415.42158

Los valores mostrados por el sensor son muy cercanos al valor de la solución estándar de conductividad, para calibrar su voltaje se buscó un coeficiente de calibración de voltaje para cada medición, se obtuvieron con la función de buscar objetivo en Excel, cada coeficiente multiplica el voltaje leído, y se obtiene un voltaje afectado, el cual es el que se emplea en la ecuación, como se muestra en la *Tabla 12*.

Posteriormente se obtuvo un coeficiente de calibración de voltaje promedio de 0.99775, el cual se añadirá a la programación.

Tabla 12. Coeficiente de calibración de voltaje para el sensor de SDT.

Coef. Cal. Voltaje	T °C	Voltaje (V)	Voltaje Afectado (V)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.99500	23.94	1.7427	1.7340	1413.0001
0.99855	23.94	1.7365	1.7340	1413.0001
0.99835	23.93	1.7369	1.7340	1413.0001
0.99600	23.93	1.7410	1.7340	1413.0001
0.99761	23.95	1.7381	1.7340	1413.0001
0.99786	23.94	1.7377	1.7340	1413.0001



0.99689	23.96	1.7394	1.7340	1413.0001
0.99878	23.92	1.7361	1.7340	1413.0001
0.99970	23.94	1.7345	1.7340	1413.0000
0.99881	23.95	1.7360	1.7340	1413.0001

La ecuación de conductividad eléctrica es válida para valores de voltaje de cero a 5, y tiene un rango de medición de cero a 14,567.95 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Y como se establece en la *Ecuación 6* que se encuentra en el *Anexo A1.2. Sensor de sólidos disueltos totales*, si se miden los SDT el sensor cubre un rango de cero a 7,283.98 mg/l.

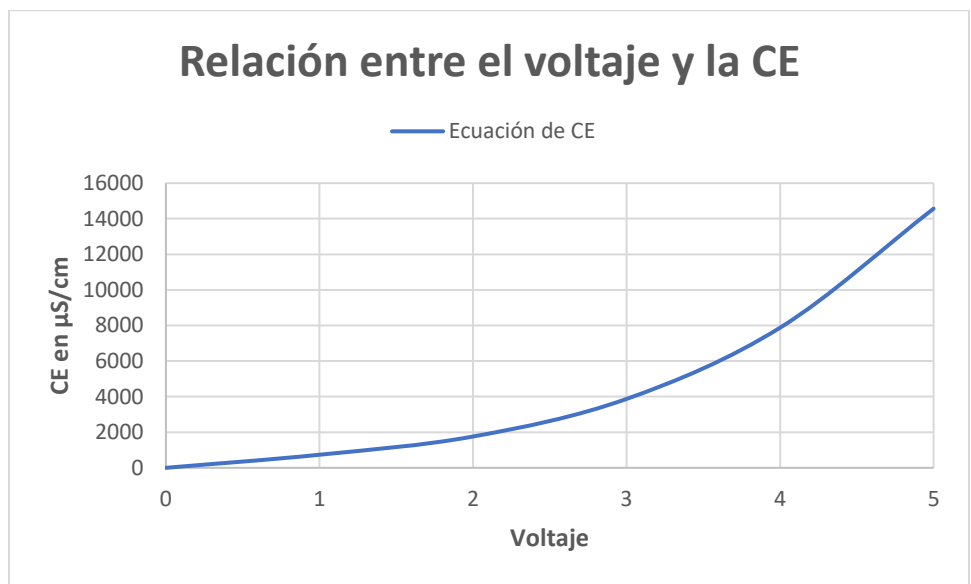


Figura 23. Relación entre el voltaje y la CE, empleando la Ecuación 5.

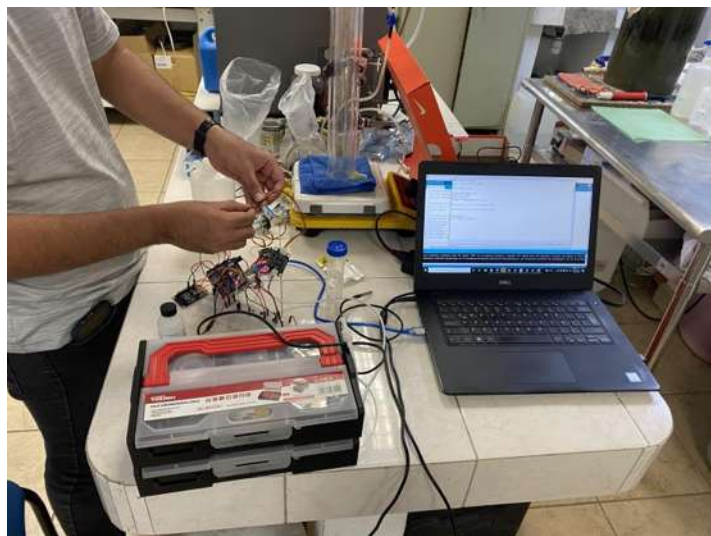


Figura 24. Calibración del sensor de SDT, elaboración propia.

Calibración del sensor de turbidez

Para calibrar el sensor de turbidez, se empleó la *Ecuación 9* que se encuentra en el *Anexo A1.3. Sensor de turbidez*, que proporciona el fabricante, dicha ecuación establece una relación entre el voltaje y la turbidez, y la ecuación es válida para voltajes comprendidos entre 4.2 y 2.5, y tiene un rango de medición de entre cero y 3000.35 NTU respectivamente.

Se empleó solución estándar de formacina para turbidez a 500 NTU como lo establece la NMX- AA-038-SCFI-2001 (SINEC, 2001), con la que se prepararon diferentes diluciones, para medirlas con el sensor. Para el valor de cero se empleó agua destilada, las diluciones preparadas fueron de 5, 10, 20 y 50 NTU. Los resultados del voltaje marcado por el sensor y por la ecuación se muestran en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Relación de voltaje y turbidez.

0 NTU		5 NTU		10 NTU		20 NTU		50 NTU	
Voltaje (V)	Turbidez (NTU)	Voltaje (V)	Turbidez (NTU)	Voltaje (V)	Turbidez (NTU)	Voltaje (V)	Turbidez (NTU)	Voltaje (V)	Turbidez (NTU)
4.2666	-248.4250	4.2567	-210.7411	4.2464	-171.6875	4.2432	-159.6708	4.2340	-125.2497
4.2656	-244.6078	4.2557	-206.9549	4.2454	-167.9335	4.2422	-155.9267	4.2330	-121.5342
4.2661	-246.5161	4.2562	-208.8477	4.2459	-169.8102	4.2427	-157.7979	4.2335	-123.3911
4.2642	-239.2675	4.2543	-201.6580	4.2440	-162.6816	4.2408	-150.6885	4.2316	-116.3360
4.2651	-242.7001	4.2552	-205.0626	4.2449	-166.0573	4.2417	-154.0551	4.2325	-119.6769
4.2656	-244.6078	4.2557	-206.9549	4.2454	-167.9335	4.2422	-155.9262	4.2330	-121.5337
4.2646	-240.7929	4.2547	-203.1709	4.2444	-164.1817	4.2412	-152.1846	4.2320	-117.8206
4.2637	-237.3614	4.2538	-199.7673	4.2435	-160.8070	4.2403	-148.8189	4.2312	-114.4807
4.2666	-248.4250	4.2567	-210.7411	4.2464	-171.6875	4.2432	-159.6701	4.2340	-125.2489
4.2656	-244.6078	4.2557	-206.9549	4.2454	-167.9335	4.2422	-155.9262	4.2330	-121.5337

Como se observa, los valores de voltaje obtenidos son mayores al límite de voltaje establecido en la ecuación, por lo que es necesario encontrar un coeficiente de calibración que afecte el voltaje y muestre los valores correctos de turbidez.

Se calculó el promedio de voltajes para cada valor de turbidez, en la *Tabla 14* se muestran varios coeficientes de calibración de voltaje, obtenidos con la función buscar objetivo en Excel, cada coeficiente multiplica al voltaje leído, y se obtiene un voltaje afectado, el coeficiente de calibración de voltaje promedio de 0.98763.



Tabla 14. Coeficiente de calibración de voltaje para el sensor de turbidez.

Coef. Cal. Volt.	Voltaje leído (V)	Voltaje afectado (V)	Turbidez estándar (NTU)	Turbidez Arduino (NTU)
0.9847	4.2654	4.2002	0	0.0000
0.9867	4.2555	4.1989	5	5.0000
0.9888	4.2452	4.1975	10	9.9996
0.9889	4.2420	4.1948	20	19.9996
0.9891	4.2328	4.1866	50	49.9998

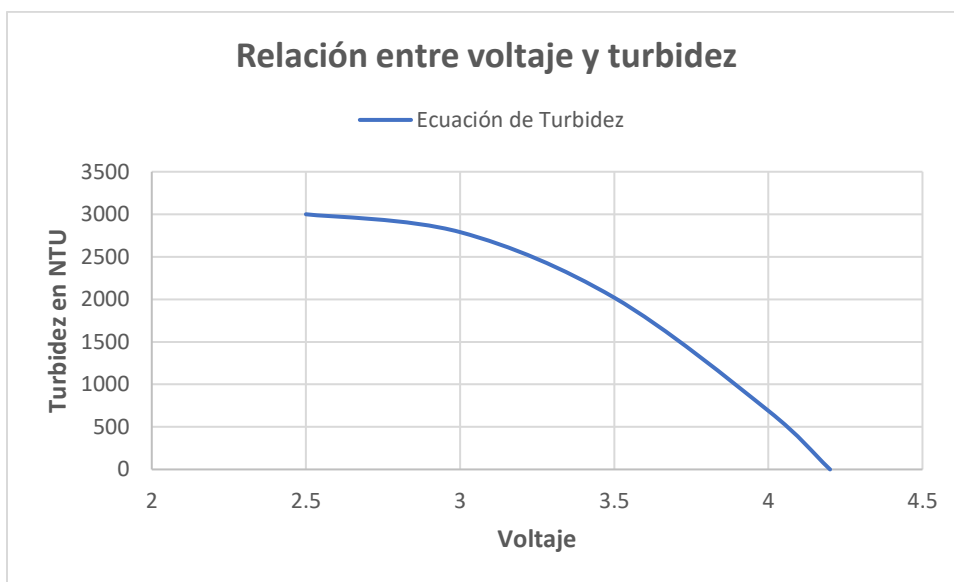


Figura 25. Relación entre el voltaje y la turbidez, empleando la Ecuación 9.



Figura 26. Diluciones de 5, 10, 20 y 50 NTU, preparadas para la calibración del sensor de turbidez.

8.3.4. Validación del prototipo

Validación del pluviómetro

Para validar que la información obtenida por el pluviómetro WH-SP-RG fuera correcta, se utilizó un pluviómetro volumétrico, y se compararon los volúmenes captados en 24 horas, los datos obtenidos se muestran en la

Tabla 15, el porcentaje de error relativo se calculó con la *Ecuación 1*, la lluvia corresponde del día jueves 14 al viernes 15 de julio de 2022.

Tabla 15. Monitoreo 1, del 14 al 15 de julio de 2022.

Pluviómetro Volumétrico		
Diámetro	0.15980	m
Área	0.02006	m ²
Volumen	0.24000	l
Precipitación	11.97	mm
Pluviómetro WH-SP-RG		
Volteos	36	
Lámina	0.31	mm
Precipitación	11.16	mm
Diferencia	0.81	mm
% de error	6.74	%

Se hizo un segundo monitoreo en el que se obtuvieron los siguientes datos, del 18 al 19 de julio del 2022:

Tabla 16. Monitoreo 2, del 18 al 19 de julio de 2022.

Pluviómetro Volumétrico		
Diámetro	0.15980	m
Área	0.02006	m ²
Volumen	0.08500	l
Precipitación	4.24	mm
Pluviómetro WH-SP-RG		
Volteos	13	
Lámina	0.31	mm
Precipitación	4.03	mm
Diferencia	0.21	mm
% de error	4.91	%

El porcentaje de error se encuentra dentro del margen del $\pm 10\%$ tolerable por parte del fabricante, por lo que se acepta la calibración.

Validación del sensor de pH

Para validar el sensor de pH, se empleó el multiparamétrico portátil Thermo Scientific Orion, que se calibró previamente, para comparar las mediciones entre el equipo comercial y el de bajo costo, se utilizó un volumen de 100 ml de agua desionizada, a la que se le agregaron diferentes concentraciones de H_2SO_4 al 0.01M para disminuir su pH, la temperatura era de $23.4^\circ C$ y el tiempo de agitación para mezclar las sustancias fue de 1 minuto, los datos obtenidos se muestran en la *Tabla 17*, el porcentaje de error relativo se calculó con la *Ecuación 1*.

Tabla 17. Comparación de mediciones de pH.

Volumen Agregado (ml)	Concentración (M)	pH Thermo	Arduino pH	Diferencia	% ERROR
0	0	7.65	7.67	0.0156	0.2040
0	0	7.63	7.65	0.0200	0.2622
0	0	7.57	7.61	0.0398	0.5260
0	0	7.52	7.57	0.0502	0.6680
0	0	7.47	7.53	0.0600	0.8038
0.05	4.998×10^{-6}	5.91	6.11	0.2003	3.3891
0.05	4.998×10^{-6}	5.85	6.05	0.2000	3.4188
0.05	4.998×10^{-6}	5.83	6.02	0.1885	3.2337
0.05	4.998×10^{-6}	5.92	6.11	0.1940	3.2770
0.05	4.998×10^{-6}	5.87	6.05	0.1800	3.0664
0.1	9.990×10^{-6}	4.36	4.55	0.1900	4.3578
0.1	9.990×10^{-6}	4.41	4.57	0.1600	3.6281
0.1	9.990×10^{-6}	4.35	4.54	0.1900	4.3678
0.1	9.990×10^{-6}	4.38	4.56	0.1804	4.1184
0.1	9.990×10^{-6}	4.43	4.61	0.1850	4.1754
0.15	1.498×10^{-5}	4.07	4.26	0.1910	4.6929
0.15	1.498×10^{-5}	4.04	4.22	0.1800	4.4554
0.15	1.498×10^{-5}	4.02	4.21	0.1900	4.7264
0.15	1.498×10^{-5}	4.11	4.31	0.1967	4.7851
0.15	1.498×10^{-5}	4.09	4.29	0.2000	4.8900
0.25	2.494×10^{-5}	3.89	4.08	0.1900	4.8843
0.25	2.494×10^{-5}	3.83	4.01	0.1800	4.6997



0.25	2.494x10 ⁻⁵	3.86	4.04	0.1800	4.6632
0.25	2.494x10 ⁻⁵	3.89	4.07	0.1800	4.6272
0.25	2.494x10 ⁻⁵	3.91	4.10	0.1900	4.8593

Como se observa, el porcentaje de error relativo no supera el $\pm 10\%$ que garantiza el fabricante.

Validación del sensor de SDT

Para validar el sensor de SDT, se aforó a 100 ml con agua desionizada diferentes volúmenes de solución de NaCl al 0.1M, a una temperatura de 23.94°C, empleando un tiempo de agitación de un minuto para mezclar las sustancias, los datos obtenidos se muestran en la *Tabla 18*, los errores relativos se calcularon empleando la *Ecuación 1*.

Tabla 18. Comparación mediciones de conductividad eléctrica.

Volumen Agregado (ml)	Concentración	CE Thermo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Arduino CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Diferencia	% ERROR
0	0	5.033	5.2377	0.2047	4.0666
0	0	5.042	5.2462	0.2042	4.0503
0	0	5.037	5.2428	0.2058	4.0858
0	0	5.041	5.2462	0.2052	4.0710
0	0	5.035	5.2411	0.2061	4.0932
0.1	0.0001	16.697	17.1499	0.4529	2.7124
0.1	0.0001	16.708	17.1651	0.4571	2.7361
0.1	0.0001	16.691	17.1482	0.4572	2.7392
0.1	0.0001	16.702	17.1550	0.4530	2.7121
0.1	0.0001	16.707	17.1592	0.4522	2.7067
1	0.001	147.257	148.7023	1.4453	0.9815
1	0.001	147.271	148.7085	1.4375	0.9761
1	0.001	147.265	148.6862	1.4212	0.9651
1	0.001	147.278	148.6640	1.3860	0.9411
1	0.001	147.254	148.6251	1.3711	0.9311
10	0.01	1417.213	1411.3307	5.8823	0.4151
10	0.01	1417.421	1411.7936	5.6274	0.3970
10	0.01	1417.417	1411.7329	5.6841	0.4010
10	0.01	1417.219	1411.3798	5.8392	0.4120
10	0.01	1417.391	1411.7925	5.5985	0.3950

Como se puede observar el porcentaje de error se encuentra dentro del margen del $\pm 10\%$ que garantiza el fabricante.



Validación del sensor de turbidez

Para la validación, se midieron nuevamente los estándares de formacina preparados, con el coeficiente de calibración de voltaje cargado en el código de programación, los resultados se muestran en la *Tabla 19*, el error relativo se calculó empleando la *Ecuación 1*:

Tabla 19. Comparación de turbidez entre el estándar de formacina y el sensor de bajo costo.

Turbidez estándar (NTU)	Turbidez Arduino (NTU)	Diferencia	% ERROR
0	-0.1661	0.1661	-
0	-0.1298	0.1298	-
0	-0.1588	0.1588	-
0	-0.1657	0.1657	-
0	-0.2023	0.2023	-
5	4.7972	0.2028	4.0565
5	4.8048	0.1952	3.9044
5	4.7939	0.2061	4.1224
5	4.8011	0.1989	3.9778
5	4.7967	0.2033	4.0659
10	9.8649	0.1351	1.3511
10	9.8794	0.1206	1.2064
10	9.8613	0.1387	1.3873
10	9.8323	0.1677	1.6768
10	9.8573	0.1427	1.4271
20	19.8061	0.1939	0.9695
20	19.8072	0.1928	0.9639
20	19.8069	0.1931	0.9656
20	19.8098	0.1902	0.9511
20	19.8100	0.1900	0.9500
50	49.6414	0.3586	0.7172
50	49.6449	0.3551	0.7101
50	49.6047	0.3953	0.7905
50	49.6058	0.3942	0.7883
50	49.6094	0.3906	0.7812



Como se puede observar el porcentaje de error se encuentra dentro del margen del $\pm 10\%$ aceptable por el fabricante.

8.4. Construcción de Estaciones de Monitoreo de Calidad del Agua de Lluvia (EMCAL)

Después de haber pasado la validación el primer prototipo, se procede a construir más estaciones de monitoreo, con la finalidad de poder hacer un monitoreo de forma espacial en la ciudad de Morelia. El costo de construcción se muestra en la

Tabla 20 en el ANEXO 3. Costo total en la construcción de una estación de monitoreo de calidad del agua de lluvia.

Una limitante que se tiene es el costo de los sensores, componentes electrónicos, placas de desarrollo y el filamento para la impresión en 3D, y dado que la construcción de solo una estación de monitoreo ronda los \$127 USD, se opta por fabricar solo 4 estaciones de monitoreo de calidad del agua de lluvia para este proyecto.

8.5. Identificación de lugares donde instalar EMCAL

Las 4 estaciones construidas se instalarán donde se encuentran las estaciones 2, 3, 6 y 11 del SAIH. El criterio para la selección de los puntos fue el siguiente: 1.- Que cada estación se encuentre en un cuadrante de la ciudad de Morelia, 2.- Que sea fácil el acceso, para su mantenimiento.

En el noroeste (Sector República) se encuentra la estación E0003 Gertrudis Sánchez, en el noreste (Sector Revolución) se encuentra la estación E0002 Independencia, en el suroeste (Sector Independencia) se encuentra la estación E0011 Ciudad Universitaria y en el sureste (Sector Nueva España) se encuentra la estación E0006 Lomas de las Américas Sur.

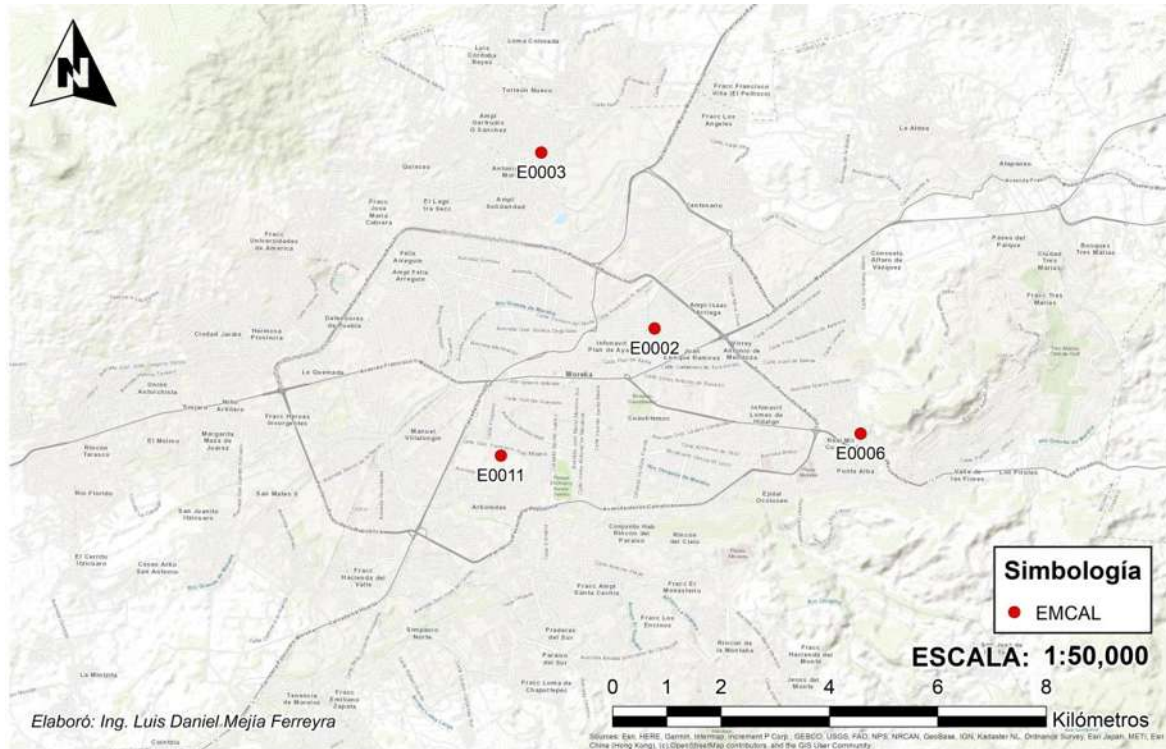


Figura 27. Localización de las estaciones de monitoreo de calidad del agua de lluvia.

8.6. Instalación de EMCAL

La instalación de las estaciones de monitoreo calidad del agua de lluvia, varía de acuerdo a las condiciones del lugar, la EMCAL debe colocarse en un lugar a cielo abierto, esto con la finalidad de captar el agua de forma directa, sin que ésta escurra por una superficie, también debe encontrarse lejos de árboles y arbustos, ya que estos puedan arrojar desechos sólidos al prototipo y afectar las lecturas hechas por los sensores. También hay que recordar que la temperatura máxima de funcionamiento de los sensores ronda los 50°C, por lo que para garantizar el correcto funcionamiento de los sensores, hay que procurar instalar la EMCAL en un lugar donde los rayos del sol no impacten directamente a la carcasa durante gran parte del día.

En la *Figura 28*, se muestra como se instaló el prototipo para el monitoreo de la calidad del agua en la estación del SAIH E0011 de Ciudad Universitaria, y en la *Figura 29* se muestra como están acomodados los sensores de calidad del agua de lluvia.

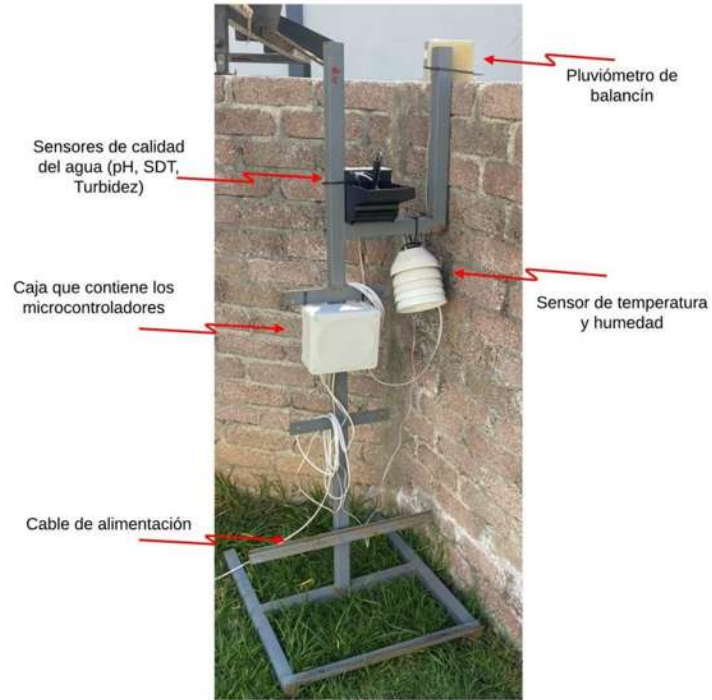


Figura 28. Estación meteorológica del SAIH al que se le integraron sensores para el monitoreo de la calidad del agua de lluvia.

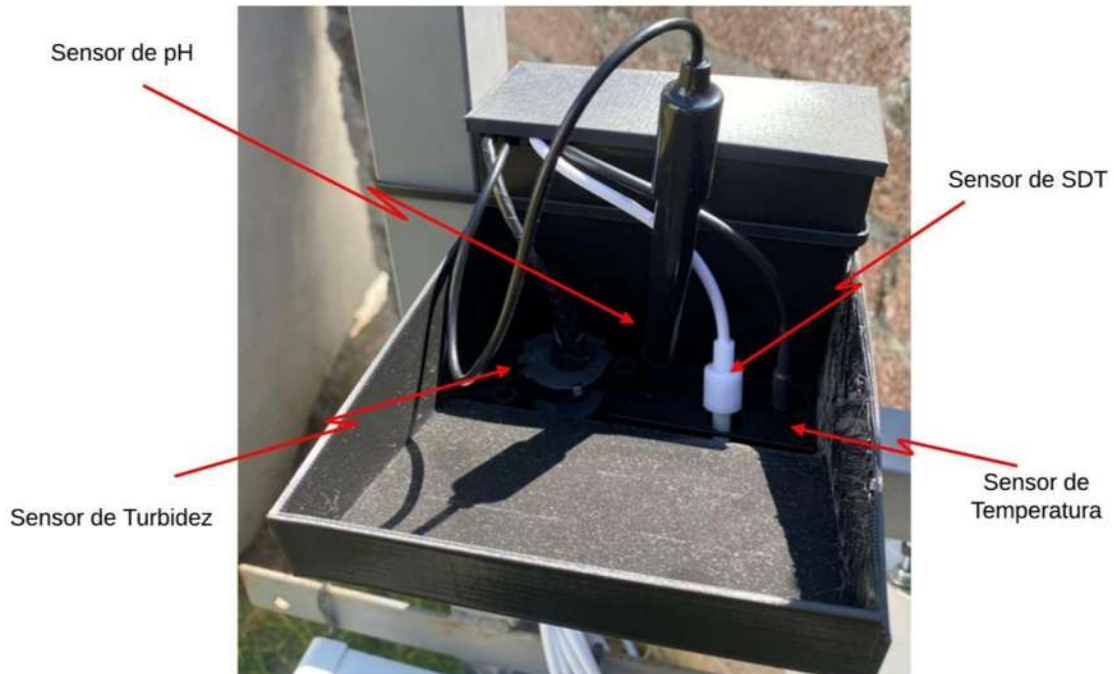


Figura 29. Sensores de calidad del agua de lluvia.

8.7. Desarrollo de plataforma para visualizar datos de forma espacial y temporal

8.7.1. Análisis de requerimientos de la plataforma

En el capítulo 2.8. Diseño, se muestra una lista con las opciones de diseño para sitios web (Luján Mora, 2002), que después de hacer una revisión bibliográfica, se seleccionaron las opciones mostradas en el apartado de análisis de los requerimientos de la plataforma en el capítulo 7. METODOLOGÍA.

8.7.2. Diseño de la plataforma

La base de datos desarrollada, se diseñó pensando en integrar más sensores a futuro, por lo que se cuentan con diferentes variables, que se dividen en dos categorías, variables meteorológicas: temperatura (tmp), humedad (hum), precipitación (pcp), intensidad de precipitación (ins), que son variables que ya se están monitoreando en el SAIH; y variables ambientales: pH (ph), sólidos disueltos totales (sdt) y turbidez (tbd).



Figura 30. Desarrollo de la base de datos.

El sitio se desarrolló de forma local, utilizando una plantilla gratuita de Bootstrap (SB Admin 2), la plantilla empleada se muestra en la Figura 31.

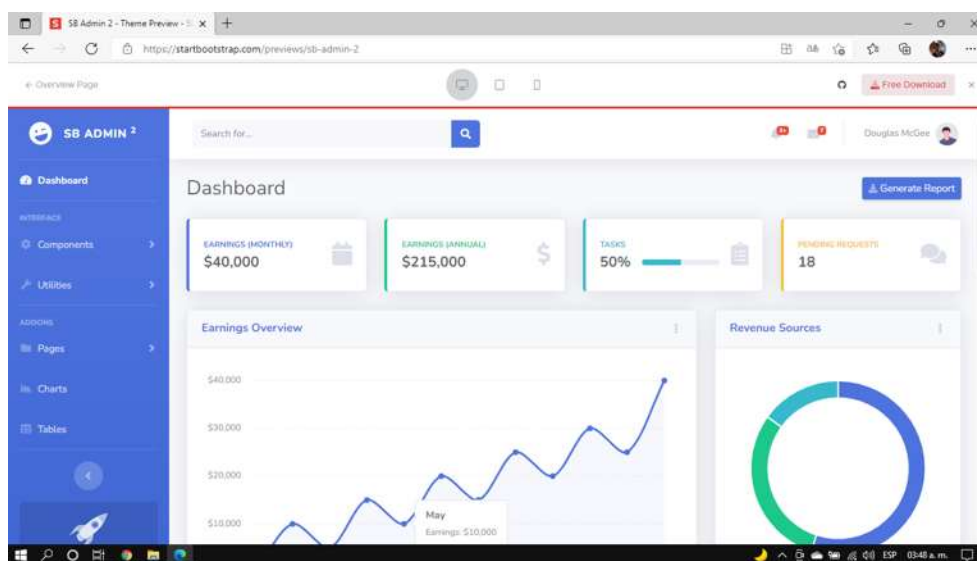


Figura 31. Interfaz de usuario de la plantilla gratuita SB Admin 2.

Se tomaron algunos elementos gráficos de la plantilla de Bootstrap, como los elementos del espacio Dashboard, que tienen forma de tarjetas, las cuales sirvieron como indicadores de las diferentes variables que se están monitoreando. En el fondo de la página se colocó un mapa de terreno del api de Google maps y se delimitó la zona en estudio, con los marcadores se indicaron las ubicaciones de todas las estaciones de monitoreo, se usa una tarjeta del Dashboard para mostrar la fecha y hora de la entrada más reciente de datos, en la barra de navegación se ha colocado el logo del sitio web, y si no se selecciona alguna estación se muestra el nombre de “Morelia” y se muestran los promedios aritméticos de las variables. Si se selecciona alguna estación se muestran los datos más recientes de la estación seleccionada. También en la barra de navegación se localizan dos listas desplegables, una es para que se seleccionen los indicadores que se desean mostrar en la pantalla, y la otra despliega un calendario para que el usuario coloque una fecha y hora en específico, con la finalidad de hacer una consulta temporal. Los marcadores que indican la ubicación de las estaciones cambian de color en función de la intensidad de precipitación, la escala de intensidades empleada se muestra al costado derecho de la página y está basada en la escala empleada por el Servicio Meteorológico Nacional (Servicio Meteorológico Nacional, 2022), pero adicionalmente se agregaron los valores de lluvia ligera y lluvia moderada con precipitaciones menores a 5 mm/h y menores a 10 mm/h respectivamente. En la *Figura 32*, *Figura 33* y *Figura 34* se muestra parte de la interfaz web desarrollada.

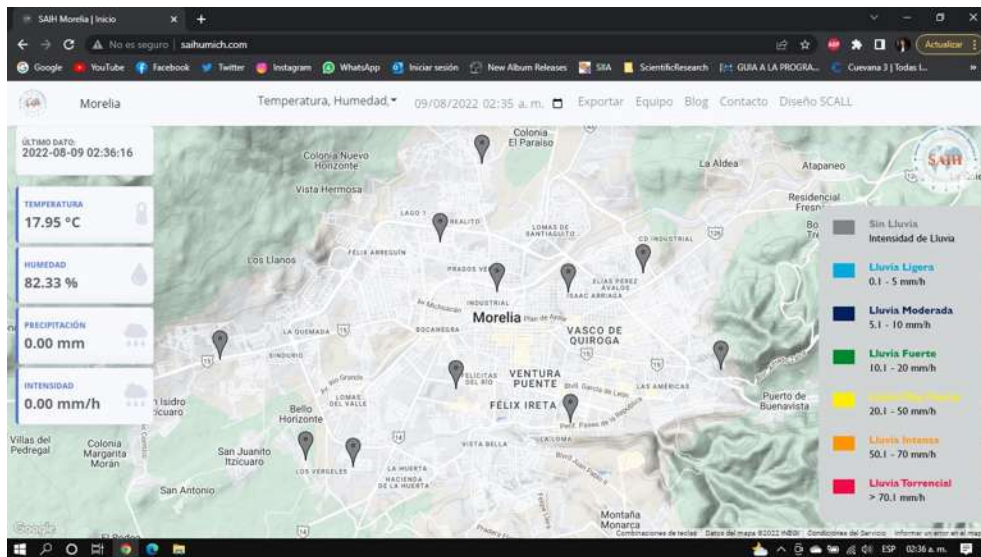


Figura 32. Interfaz web desarrollada de manera local.

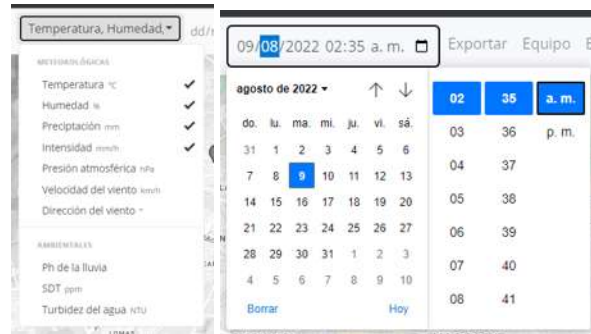


Figura 33. Interfaz para la selección de parámetros a consultar y la fecha de cuando se quiere consultar información.



Figura 34. Ventana emergente para la selección de datos y acotación de fechas para exportar en formato csv.



Figura 35. Plataforma para el diseño de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) Aqua Pluvia.

En esta plataforma se encuentran los datos de precipitación media mensual, temperatura media anual e intensidades máximas de precipitación, datos necesarios para el diseño de algunos componentes de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL). Como datos de entrada el usuario solo debe ingresar la ubicación de donde quiere instalar el SCALL, indicar el número de habitantes en la edificación, el área de captación, el material del área de captación, el tipo de uso que quiera darle al agua de lluvia y el consumo diario de agua;

Como datos de salida, el usuario obtiene el volumen del tanque de almacenamiento, diámetros recomendados para las bajadas pluviales, dimensiones de las canaletas y el funcionamiento hidráulico del SCALL donde se muestra gráficamente los meses donde dispondrá de agua de lluvia y el volumen que aprovechará, todos estos datos se obtendrán en un formato de salida descargable en pdf, como se muestra en la *Figura 36*.



AQUA PLUVIA
 Sistemas de captación pluvial

Usuario: _____

DATOS

Precipitación media
 Enero mm
 Febrero mm
 Marzo mm
 Abril mm
 Mayo mm
 Junio mm
 Julio mm
 Agosto mm
 Septiembre mm
 Octubre mm
 Noviembre mm
 Diciembre mm
 Anual mm

Hab. beneficiados Habs.
 Área de captación m²
 Coef. de escurrimiento
 Pendiente área de captación %
 Material de la superficie
 Mes de inicio de operación
 Consumo de agua l/hab/día

RESULTADOS

Vol. de almacenamiento m³

Tuberías horizontales
 Diámetro mínimo mm
 Tuberías verticales
 Diámetro mínimo mm
 Canaletas
 Ancho mínimo mm


 Se recomienda vaciar completamente el almacenamiento para su mantenimiento.

¡EMPIEZA A CAPTAR!


Figura 36. Formato de salida descargable.

8.7.3. Verificación del funcionamiento de la plataforma

Para aprobar la verificación, se comprobó que el sitio web mostrara los datos más recientes registrados en la base de datos; se comprobó que el sitio web funcionara en los navegadores de escritorio como Google Chrome, Firefox, Microsoft Edge, Brave y en navegadores de teléfonos inteligentes como Google Chrome y Safari y finalmente; se verificó que el tiempo de carga de la página fuera adecuado. Una vez que se comprobó que se cumplieron estos aspectos, se procede a la publicación del sitio web

8.7.4. Publicación del sitio web

Se contrató un servicio de hosting anual con la empresa Hostinger y adicionalmente se compró un dominio, para colgar la página web, el cual responde al siguiente enlace: <http://saihumich.com>, la página principal del sitio desarrollado se muestra en la *Figura 37*.

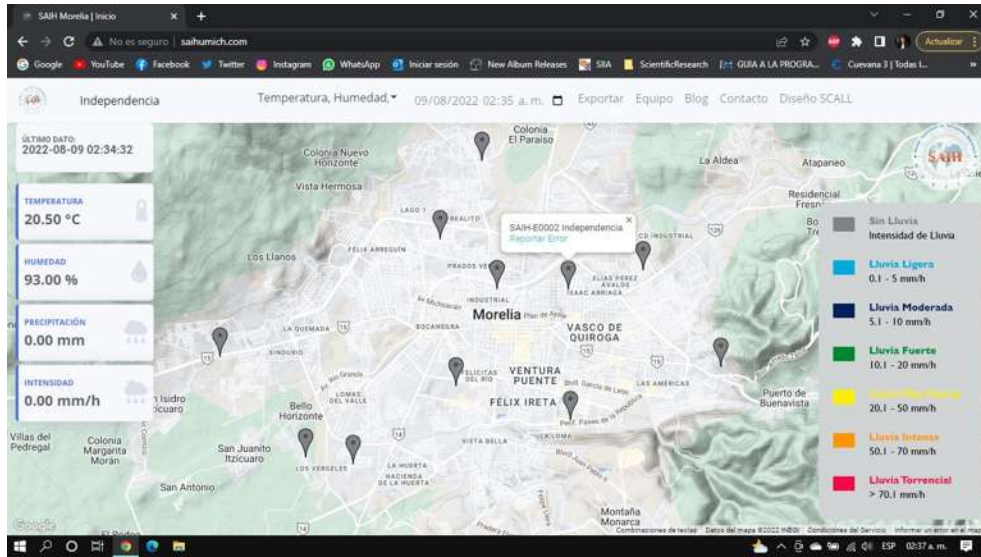


Figura 37. Sitio web en funcionamiento.

Para observar la evolución de los datos en un periodo de tiempo, si se selecciona alguna estación y se da clic en alguna de las tarjetas de los indicadores, se muestra una gráfica en tiempo real de los datos registrados en la última hora, justo como se muestra en la *Figura 38*.



Figura 38. Grafica de temperatura en tiempo real vista desde la plataforma.

9. CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo desarrollado, ofrece mediciones continuas y confiables de la calidad del agua de lluvia de forma remota a un costo sustancialmente reducido, permitiendo excluir el uso de equipos analíticos de alto costo y de realizar los análisis en el sitio.

El monitoreo constante de la calidad del agua de lluvia, permitirá tener un seguimiento de la composición fisicoquímica del agua de lluvia y así poder establecer una relación entre el agua de lluvia y las emisiones antropogénicas y naturales, además de que se podrá verificar la influencia de los contaminantes atmosféricos en los patrones de la lluvia.

Por otro lado, es importante mencionar que es probable que ocurran errores de medición en el dispositivo de bajo costo debido a diversos factores, sin embargo, dichos errores se pueden minimizar dándole mantenimiento al equipo y calibrando los sensores de forma periódica.

Los marcadores de las estaciones que cambian de color en función de los indicadores, funcionan como un sistema de alerta para mostrar las zonas en las que está lloviendo, la intensidad a la que llueve y la calidad del agua que se presenta.

El agua de lluvia en la ciudad de Morelia es una potencial fuente alternativa de abastecimiento para consumo humano, especialmente cuando las fuentes superficiales y subterráneas de las que depende la ciudad se han visto afectadas debido a la sequía que enfrenta el país.

Una ventaja de contar con un sistema con hardware de código abierto es que las piezas se pueden reemplazar con otro hardware (similar) sin la necesidad de contactar a los desarrolladores del producto. De igual manera, contar con software de código abierto permite que se puedan ampliar o reducir las variables a monitorear.

La plataforma web para el diseño de SCALL busca facilitar el proceso de diseño para aquellas personas que no cuentan con los conocimientos técnicos y están interesadas en instalar un SCALL, todo esto para garantizar un desempeño óptimo.

10. RECOMENDACIONES

La carcasa del prototipo desarrollado se fabricó empleando filamento PLA, el cual no es apto para aplicaciones de temperaturas altas, como el estar a intemperie bajo los rayos del sol, ya que tiene una temperatura de transición vítrea a 60° C, es decir que a temperaturas altas el material se puede deformar y perder resistencia.

Para la mejora del prototipo se recomienda elaborar su carcasa con un material que resista mayores temperaturas como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el cual tiene una temperatura de transición vítrea de 105° C.

Para futuras iteraciones del prototipo también se recomienda modificar el diseño de la carcasa, porque en el diseño actual es posible que ingresen partículas sólidas de tamaños superiores de 0.5 cm de diámetro, lo cual modifica las propiedades del agua de lluvia que se esté analizando.



Se recomienda el limpiar los sensores de forma periódica, para evitar interferencias en las mediciones. Además de que se deben realizar calibraciones periódicas, para garantizar que el equipo indique las mediciones correctas, al menos una vez a la semana en periodo de lluvias y una vez al mes cuando no llueva.

11. REFERENCIAS

- Ágora. (31 de Agosto de 2022). *¿Cuánta agua hay en el mundo?* Obtenido de <https://www.elagoradiario.com/open-data/infografias/agua-planeta/>
- Alicant Scientific. (23 de Diciembre de 2021). *Verificación, Validación o Calibración?* Obtenido de <https://www.alicat.com/es/verificacion-validacion-o-calibracion/>
- Alimorong, F. M., Apacionado, H. A., & Villaverde, J. F. (2020). Arduino-based Multiple Aquatic Parameter Sensor Device for Evaluating pH, Turbidity, Conductivity and Temperature. *IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1-5.
- Alternative Technology Association. (16 de Abril de 2022). *Tankulator*. Obtenido de <https://tankulator.ata.org.au/>
- Andrades Rodríguez, M., & Muñoz León, C. (2012). *Fundamentos de climatología*. Logroño, España: Iberus.
- Aqion. (25 de Abril de 2018). *Temperature Compensation for Conductivity*. Obtenido de <https://www.aqion.de/site/112>
- ARCSA. (2013). *Rainwater Catchment Systems*. Rosemont: ASPE.
- Arduino. (30 de Julio de 2021). *What is Arduino?* Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- AUTODESK. (21 de Agosto de 2022). *Fusion 360*. Obtenido de https://www.autodesk.mx/products/fusion-360/overview?mktvar002=4424517|SEM|13036149246|133509004999|aud-442447752699:kwd-11029869505&ef_id=Cj0KCQjw7KqZBhCBARIsAI-fTKJ02QjHSx3C60FEv44qZNK4trFVGh1y8f81blwG8ksghZ0vc0Z2s7gaAk1QEALw_wcB:G:s&s_kwid=AL!11172!3!
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Rev. Esp, Salud Pública*, 159-175.
- Balluff. (30 de Julio de 2021). *Cómo funciona un sistema de sensores*. Obtenido de <https://www.balluff.com/es-mx/mx/service/basics-of-automation/fundamentals-of-automation/basic-of-sensing/>
- Banco de Desarrollo de América Latina. (1 de Junio de 2016). *¿Por qué es tan importante el tratamiento de aguas residuales?* Obtenido de <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2016/06/por-que-es-tan-importante-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>



- Benitez, J. (1993). *Process Engineering and Design for Air Pollution Control*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Benkorits, C. (1982). Compilación on inventory of antropogenic emissions in the United States and Canada. *Atm. Env.*
- Bolaños, K., Sibara, J., Mora, J., Umaña, D., Cambroner, M., Sandolval, L., & Martínez, M. (2019). Estudio preliminar sobre la composición atmosférica del agua de lluvia en y los alrededores del Parque Nacional del Volcán Poás. *Memorias del I Congreso Internacional de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional, Costa Rica*, 1-11.
- Bravo, H., Sosa, R., & Torres, R. (1991). Ozono y lluvia ácida en la ciudad de México. *Ciencias: UNAM*, 33-40.
- Chowdury, M. S., Emran, T. B., Ghosh, S., Pathak, A., Alam, M. M., Absar, N., . . . Hossain, M. S. (2019). IoT based real-time river water quality monitoring system. *Procedia Computer Science*, 161-168. doi:10.1016/j.procs.2019.08.025
- CLICOM. (30 de Julio de 2021). *BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL (SISTEMA CLICOM)*. Obtenido de <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Cloete, N. A., Malekian, R., & Nair, L. (2014). Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring. *Journal od LATEX Class Files*, 1-15.
- CONAGUA. (2013). *Recursos Hídricos en el Estado de Michoacán*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (23 de Mayo de 2016). *Normas Mexicanas*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- CONAGUA. (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (1 de Marzo de 2021). *Calidad del agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- CONAGUA. (30 de Julio de 2021). *Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Construmática. (25 de Enero de 2010). *SCADA*. Obtenido de https://www.construmatica.com/construpedia/index.php?title=SCADA&mobileacti on=toggle_view_desktop



- Cousins, I. T., Johansson, J. H., Salter, M. E., Sha, B., & Scheringer, M. (2022). Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). *Environmental Science & Technology*, 11172-11179.
- DFRobot. (30 de Julio de 2021). *Gravity: Analog TDS Sensor Meter for Arduino SKU SEN0244*. Obtenido de <https://www.dfrobot.com/product-1662.html>
- DFRobot. (30 de Julio de 2021). *PH meter SKU SEN0161*. Obtenido de https://wiki.dfrobot.com/PH_meter_SKU__SEN0161_
- DFRobot. (30 de Julio de 2021). *Turbidity sensor SKU SEN0189*. Obtenido de https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU__SEN0189
- Douglas-Young, J. (2000). *Diccionario enciclopédico de electrónica*. Ceac.
- Enciso, L., & Vargas, A. (2018). Interface with Ubidots for a fire alarm system using WiFi. *Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1-6. doi:<https://doi.org/10.23919/CISTI.2018.8399327>
- Eskin, M. G., Torabfam, M., Psillakis, E., Cincinelli, A., Kurt, H., & Yüce, M. (2019). Real-Time Water Quality Monitoring of an Artificial Lake Using a Portable, Affordable, Simple, Arduino-Based Open Source Sensor. *EnvEng-IO*, 7-14.
- Fahad, S. (15 de Marzo de 2021). *Arduino Hydroponics, DIY Hydroponics System using pH Sensor & EC Sensor, Hydroponic*. Obtenido de ElectronicClinic: <https://www.electronicclinic.com/arduino-hydroponics-diy-hydroponics-system-using-ph-sensor-ec-sensor-hydroponic/>
- FAO. (1 de Septiembre de 2022). *Estrés hídrico Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/es/>
- Font Awesome. (14 de Diciembre de 2021). *Font Awesome*. Obtenido de <https://fontawesome.com/icons>
- García Rojas, H. R., Gómez Sántiz, F., & Arreola Villa, E. (2017). Demanda sectorial de agua en el estado de Michoacán: vertientes para la construcción de indicadores de sustentabilidad hídrica. *Ciencia Nicolaita*, 44-66.
- Gillette, D. A., & Sinclair, P. C. (1990). Estimation of suspension of alkaline material by dust devils in the United States. *Atmospheric Environment Vol. 24A, No. 5,* 1135-1142.
- Gleason Espíndola, J. A. (2020). *México sensible al agua: Un enfoque innovador para la gestión del agua en las ciudades mexicanas*. Ciudad de México, México.
- Goilav, N., & Loi, G. (2016). *Arduino: Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes*. Barcelona, España: Ediciones ENI. Obtenido de <https://www.ediciones-eni.com/open/mediabook.aspx?idR=256d9467932d6a4b20f41c2bbe0f9b06>



- Gutiérrez Hinestroza, M. d., & Iturralde Kure, S. A. (2017). *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. Santa Elena, Ecuador: Ediciones UPSE.
- Hakim, W. L., Hasanah, L., Mulyanti, B., & Aminudin, A. (2019). Characterization of turbidity water sensor SEN0189 on the changes of total suspended solids in the water. *Journal of Physics: Conference Series*, 1-7. doi:10.1088/1742-6596/1280/2/022064
- Hanna Instruments. (22 de Diciembre de 2021). *Medidores portátiles*. Obtenido de <https://hannainst.com.mx/categoria/medidores-portatiles/>
- Hong, W. J., Shamsuddin, N., Abas, E., Apong, R. A., Masri, Z., Suhaimi, H., . . . Noh, M. N. (2021). Water Quality Monitoring with Arduino Based Sensors. *Environments*, 1-15.
- How To Electronics. (22 de Agosto de 2022). *DIY Turbidity Meter using Turbidity Sensor & Arduino*. Obtenido de <https://how2electronics.com/diy-turbidity-meter-using-turbidity-sensor-arduino/>
- Huang, D. Y., Xu, Y. G., Peng, P., Zhang, H. H., & Lan, J. B. (2009). Chemical composition and seasonal variation of acid deposition in Guangzhou, South China: Comparison with precipitation in other major Chinese cities. *Environmental Pollution*, vol. 157, no. 1, 35–41.
- HyperPhysics. (24 de Marzo de 2021). *Temperature*. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/temper.html>
- HyperPhysics. (30 de Julio de 2021). *Temperature Coefficient of Resistance*. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/restmp.html>
- IMPLAN Morelia. (31 de Agosto de 2022). *AGUA*. Obtenido de <https://implanmorelia.org/virtual/agua-2/>
- Industrial Shields. (21 de Diciembre de 2021). *Sensor de Temperatura DS18B20*. Obtenido de https://www.industrialshields.com/es_ES/shop/product/is-stds18b20-2-sensor-de-temperatura-ds18b20-10m-55oc-to-125oc-1719#attr=
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Morelia, Michoacán de Ocampo*. Ciudad de México.
- Interserver. (30 de Julio de 2021). *Common Network Protocols and Their Ports*. Obtenido de <https://www.interserver.net/tips/kb/common-network-protocols-ports/>
- Iqbal, S., & Mido, Y. (2020). *Chemistry of Air and Air Pollution*. New Delhi: DISCOVERY PUBLISHING HOUSE.
- Japan International Cooperation Agency. (1990). *Osaka city's Air Pollution- control measures*. Osaka, Japon: Tokio: Environment División.



- KEYENCE. (4 de Septiembre de 2022). *El significado de la Calibración*. Obtenido de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/environment/calibration.jsp#:~:text=La%20calibraci%C3%B3n%20signific,a%20utilizar%20un,con%20un%20est%C3%A1ndar%20de%20medici%C3%B3n>.
- Lambrou, T. P., Anastasiou, C., Panayiotou, C., & Polycarpou, M. (2014). A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking Water Distribution Systems. *IEEE Sensors Journal*, 2765-2772.
- Larssen, T., Semb, A., Mulder, J., Muniz, I., Vogt, R., Lydersen, E., . . . Seip, H. M. (1999). Acid deposition and its effects in China: An overview. *Environmental Science & Policy*, vol. 2, no. 1, 9-24.
- Lewis, W., & Grant, M. (1980). Acid precipitation in the Western United States. *Science*, 207.
- LibreTexts. (30 de Julio de 2021). *Temperature Dependence of the pH of pure Water*. Obtenido de [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Acids_and_Bases/Acids_and_Bases_in_Aqueous_Solutions/The_pH_Scale/Temperature_Dependence_of_the_pH_of_pure_W](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Acids_and_Bases/Acids_and_Bases_in_Aqueous_Solutions/The_pH_Scale/Temperature_Dependence_of_the_pH_of_pure_W)
- Likens, G., & Bormann, F. (1974). Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science*, 184.
- Ling, T. (2022). A Global Study About Water Crisis. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Proceedings of the 2021 International Conference on Social Development and Media Communication (SDMC 2021)*.
- Logicbus. (5 de Septiembre de 2022). *Sensores, Transductores y Acondicionadores*. Obtenido de <https://www.logicbus.com.mx/transductores-sensores.php>
- López, F. A., Zurita, R. A., Cerven, D. C., & Naranjo, E. C. (2017). *Clasificación de los Instrumentos de Medición*. Obtenido de <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/clasificacion-de-instrumentos1>
- Luján Mora, S. (2002). *Programación de aplicaciones web: Historia, principios básicos y clientes web*. Alicante, España: Editorial Club Universitario.
- Malhotra, R., Devaraj, H., Baldwin, B., Kolli, V., Lehman, K., Li, A., & Lin, C. (2019). Integrating Electronics with Solid Structures Using 3D Circuits. *IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference*, 1-11.
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & Garcia, M. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a



- propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 72-82.
- Meirose, T. (30 de Julio de 2021). *Essentials of pH Measurement*. Obtenido de ThermoFisher Scientific: http://www.ohiowea.org/docs/1500_pH_Seminar_Meirose.pdf
- Migliavacca, D., Teixeira, E. C., Wiegand, F., Machado, A. C., & Sanchez, J. (2005). Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil. *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 10, 1829-1844.
- Miyara, F. (2004). *Conversores D/A y A/D*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
- Negara, R. M., Tulloh, R., Hadiansyah P.N, N., & Zahra, R. T. (2019). My Locker : Loaning Locker System Based on QR Code. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 12-19.
- Oelen, A., van Aart, C., & de Boer, V. (2018). Measuring surface water quality using a low-cost sensor kit within the context of rural Africa. *CEUR Workshop Proceedings*.
- Omega Engineering. (30 de Julio de 2021). *Conductivity meter*. Obtenido de <https://www.omega.co.uk/prodinfo/conductivity-meter.html>
- OMS. (14 de Junio de 2019). *Agua, datos y cifras*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- OMS. (22 de Septiembre de 2021). *Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution#:~:text=y%20el%20tabaquismo,-,La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20es%20una%20de%20las%20mayores%20amenazas,vez%20la%20cal>
- OMS. (1 de Septiembre de 2022). *Contaminación atmosférica*. Obtenido de https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- ONU Mujeres. (31 de Octubre de 2010). *¿Cuál es el monitoreo y la evaluación?* Obtenido de <https://www.endvawnow.org/es/articles/330-cul-es-el-monitoreo-y-la-evaluacin.html>
- OOAPAS. (30 de Julio de 2021). *Sistema de monitoreo de las estaciones meteorológicas*. Obtenido de <https://prevencion.ooapas.gob.mx/sistmon.php>
- Oracle. (6 de Diciembre de 2021). *¿Qué es una base de datos?* Obtenido de <https://www.oracle.com/mx/database/what-is-database/>



- Oram, B. (30 de Julio de 2021). *The pH of Water*. Obtenido de Water Research Center: <https://www.water-research.net/index.php/ph>
- Oram, B. (30 de Julio de 2021). *Water Testing Total Dissolved Solids Drinking Water Quality*. Obtenido de Total Dissolved Solids (TDS): <https://www.water-research.net/index.php/water-treatment/tools/total-dissolved-solids>
- Ospina Zuñiga, Ó. E., & Ramírez Arcila, H. (2014). Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en la ciudad de Ibagué, Tolima, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 125-137. doi:10.16925/in.v9i17.812
- Pérez Garrido, C., León Rodríguez, F. M., & Delgadillo García, G. R. (2013). *Tratamiento de Aguas Manual de Laboratorio*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Pitula, K., Dysart-Gale, D., & Radhakrishnan, T. (2010). Expanding the Boundaries of HCI: A Case Study in Requirements Engineering for ICT4D. *Information Technologies & International development*, 78-93.
- Pokřývková, J., Lackóová, L., Fуска, J., Tátošová, L., & Policht-Latawiec, A. (2016). The Impact of Air Pollution on Rainwater Quality. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 303-321.
- Protección Civil El Marqués. (12 de 07 de 2022). *Sistema de Alerta Municipio de Querétaro*. Obtenido de <http://148.220.4.26/app/earlyWarning/cmpcem/>
- Qadir, M., Boers, T. M., Schubert, S., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2003). Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities. *Agricultural Water Management*, 165-185. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00146-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00146-X).
- Raffino, M. E. (30 de Julio de 2021). *Transistor*. Obtenido de <https://concepto.de/transistor/>
- Rao, A. S., Marshall, S., Gubbi, J., Palaniswami, M., Sinnott, R., & Pettigrove, V. (2013). Design of Low-cost Autonomous Water Quality Monitoring System. *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, 14-19.
- Rastogi, N., & Sarin, M. M. (2005). Chemical characteristics of individual rain events from a semi-arid region in India: Three-year study. *Atmospheric Environment*, 3313-3323.
- Reddy, M. (2011). *API Design for C++*. Elsevier Science.
- Rigola Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: Marcombo.
- Rockcontent. (12 de Abril de 2020). *Bootstrap: ¿qué es, para qué sirve y cómo instalarlo?* Obtenido de <https://rockcontent.com/es/blog/bootstrap/>



- Rodríguez Licea, D. (2020). *Sistema Automático de Información Hidrológica de Morelia*. Morelia: UMSNH.
- Rodríguez Licea, D. (30 de Julio de 2021). *Sistema Automático de Información Hidrológica del municipio de Morelia*. Obtenido de <https://www.saihmorelia.com/>
- Samshad, M. (15 de Abril de 2021). *Rain Gauge by samshadnc - Thingiverse*. Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:4828685>
- Schwedt, G. (2001). *The essential guide to environmental chemistry*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Secretaría de Salud y Asistencia. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. "Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Ciudad de México.
- SEDEMA. (14 de Septiembre de 2022). *Cosecha de Lluvia*. Obtenido de <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/cosecha-de-lluvia#:~:text=La%20cosecha%20de%20lluvia%20tiene,y%208%20meses%20del%20a%C3%B1o>
- SEIKA. (3 de Agosto de 2019). *Qué Es Un PLC Y Cuáles Son Sus Características Principales*. Obtenido de <https://www.seika.com.mx/que-es-un-plc/>
- Serikul, P., Nakpong, N., & Nakjuatong, N. (2018). Smart Farm Monitoring via the Blynk IoT Platform. *Sixteenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering*. doi:10.1109/ICTKE.2018.8612441
- Servicio Meteorológico Nacional. (17 de Julio de 2022). *Mapa de Áreas con Potencial de Tormentas*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/avisos/mapa-de-areas-con-potencial-de-tormentas>
- SIAPA. (27 de Febrero de 2014). *CAPÍTULO 12. SISTEMAS DE CONTROL Y MONITOREO AUTOMÁTICO*. Obtenido de https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_12._sistemas_de_control_y_monitoreo_automatiko.pdf
- SINEC. (2000). *NMX-AA-093-SCFI-2000. Determinación de la conductividad electrolítica*. México.
- SINEC. (2001). *NMX-AA-038-SCFI-2001. Determinación de turbiedad en agua naturales, residuales y residuales tratadas*. México.
- SINEC. (2001). *NMX-AA-045-SCFI-2001. Determinación del color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México.



- SINEC. (2013). *NMX-AA-007-SCFI-2013. Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México.
- SINEC. (2016). *NMX-AA-008-SCFI-2016. Medición del pH en agua naturales, residuales y residuales tratadas*. México.
- SMN. (31 de Agosto de 2022). *Glosario Técnico*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>
- SNIARN. (31 de Agosto de 2022). *Informe del Medio Ambiente*. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
- Stair, R. M., & Reynolds, G. W. (2010). *Principios de sistemas de información: Un enfoque administrativo*. México, D.F.: Cengage Learning Editores.
- Start Bootstrap. (13 de Enero de 2014). *SB Admin 2 - Free Bootstrap Admin Theme - Start Bootstrap*. Obtenido de <https://startbootstrap.com/theme/sb-admin-2>
- Steren. (21 de Diciembre de 2021). *Placa de desarrollo NANO*. Obtenido de <https://www.steren.com.mx/placa-de-desarrollo-nano.html>
- Steren. (21 de Diciembre de 2021). *Placa de desarrollo NodeMcu (ESP8266)*. Obtenido de <https://www.steren.com.mx/placa-de-desarrollo-nodemcu-esp8266.html>
- Strohschön, R., Wiethoff, K., Baier, K., Lu, L., Bercht, A. L., Wehrhahn, R., & Azzam, R. (2013). Land use and Water Quality in Guangzhou, China: A survey of ecological and Social Vulnerability in Four Urban Units of the Rapidly Developing Megacity. *International Journal of Environmental Research*, 343-358.
- SUHISSA. (16 de Febrero de 2018). *SISTEMAS DE MONITOREO*. Obtenido de <https://suhissa.com.mx/sistemas-de-monitoreo/>
- Thingiverse. (12 de Julio de 2022). *Thingiverse*. Obtenido de <https://www.thingiverse.com/>
- ThingSpeak. (28 de Julio de 2021). *ThingSpeak for IoT Projects*. Obtenido de About ThingSpeak: <https://thingspeak.com/>
- Universidad Católica de la Santísima Concepción. (16 de Abril de 2022). *Eficiencia en riego a través de recarga de pozos*. Obtenido de <https://scalls.cl/>
- USEPA. (1994). *Quality Assurance Handbook of Air Pollution Measurement System, Volume 5: Precipitation Measure Systems*. Washington.
- USEPA. (30 de Julio de 2021). *Conductivity*. Obtenido de <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms59.html>
- USGS. (16 de Mayo de 2019). *El Ciclo del Agua, The Water Cycle, Spanish*. Obtenido de Water Science School: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science->



school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

USGS. (30 de Julio de 2021). *Turbidity and Water*. Obtenido de https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/turbidity-and-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Viegas, V., Dias Pereira, J. M., Girão, P., & Postolache, O. (2021). Study of latencies in ThingSpeak. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 342-348. doi:<https://dx.doi.org/10.25046/aj060139>

Vijayakumar, N., & Ramya, R. (2015). The Real Time Monitoring of Water Quality in IoT Environment. *IEEE Sponsored 2nd International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication systems*.

WeatherShack. (27 de Julio de 2022). *Tipping Bucket Rain Gauge*. Obtenido de The Most Common Type Of Automated Rain Sensor: <https://www.weathershack.com/static/ed-tipping-bucket-rain-gauge.html>

West, J., Charlton, C., & Kaplan, K. (30 de Julio de 2021). *Conductivity Meters*. Obtenido de Visual Encyclopedia of Chemical Engineering: <https://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/ProcessParameters/ConductivityMeters/ConductivityMeters.html>

Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 101-123.

Wong, W. (1995). *Fundamentos del diseño*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, SA.

Xu, Z., & Han, G. (2005). Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 12, 1954–1961.

Yao, W., Zhifang, X., Wenjing, L., Tong, Z., Zhao, X., Jiang, X. H., . . . Xiaode, Z. (2016). Chemical compositions of precipitation at three non-urban sites of Hebei Province, north China: Influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Research*, vol. 181, 115–123.

Ziervogel, G. (2019). *Unpacking the Cape Town drought: lessons learned*. Ciudad del Cabo, Sudáfrica: African Centre for Cities/Cities Support Programme.



ANEXOS

ANEXO 1. Fichas Técnicas de los sensores empleados

A1.1. Sensor de pH

El sensor de pH mide la acidez relacionando una diferencia de potencial entre dos electrodos. Uno mide el potencial eléctrico a través de una membrana de vidrio que es permeable a los iones H^+ , mientras que el otro mide el potencial eléctrico a través de una solución de referencia estándar, KCl. El sensor luego emite la diferencia de potencial entre los dos electrodos. Dado que este voltaje es una métrica de la actividad iónica de H^+ , se puede convertir en un valor de pH ($-\log [H^+]$).

Al medir el pH, existe un factor de compensación de temperatura, sin embargo, el efecto de esto es significativamente menor que en las mediciones de conductividad eléctrica. La compensación del pH también requiere la consideración de la constante de equilibrio (K_w) del agua, que dicta el pH neutro del agua, es decir, los valores neutros también se desplazan, lo que complica la corrección al rango de pH aceptable. Incorporar compensación de temperatura complicaría demasiado el diseño con pocos beneficios adicionales (LibreTexts, 2021).

El módulo cuenta con un chip regulador de voltaje incorporado que admite el suministro de voltaje amplio de 3.3-5.5V, que es compatible con 5V y 3.3V de cualquier placa de control como Arduino.

El sensor responde de forma lineal, por lo que tomando dos puntos se puede deducir la ecuación para convertir el voltaje medido en pH. La forma general se muestra en la *Ecuación 4*, donde V es el voltaje y m y b son valores que se obtienen al calcular la ecuación de la recta al momento de calibrar el sensor con las soluciones buffer de pH 4, 7 y 10.

$$pH = m * V + b$$

Ecuación 4. Ecuación general para convertir voltaje a un valor de pH.

A continuación, se presentan algunas características técnicas del sensor de pH compartidas por el fabricante (DFRobot, 2021):

Módulo placa de interfaz:

- Voltaje de entrada: 3.3 ~ 5.5 V
- Conector de sonda BNC
- Alta precisión: ± 0.1 a 25 ° C
- Rango de detección: 0 ~ 14

Electrodo de pH:

- Rango de temperatura de funcionamiento: 5 ~ 60 ° C



- Punto cero (neutral): 7 ± 0.5
- Calibración sencilla
- Resistencia interna: $<250 \text{ M}\Omega$

Descripción del Pin:

- V +: entrada de 5V.
- G: pin de tierra.
- Po: salida analógica de pH
- Do: salida de 3.3V
- A: Salida de temperatura



Figura 39. Sensor de pH analógico modelo PH-4502C (DFRobot, 2021).

El rango de pH del agua para uso y consumo humano es de 6.5 a 8.5 (Secretaría de Salud y Asistencia, 2021), y cualquier cosa por debajo se considera blanda mientras que cualquier cosa por encima se considera dura. El agua blanda es ácida y puede ser corrosiva, lo que significa que puede filtrar iones metálicos tóxicos como plomo, hierro y manganeso de las tuberías y plomería. Esto puede provocar un sabor metálico o amargo en el agua y una mancha azul verdosa de los desagües. El agua dura es básica y, aunque no representa un riesgo para la salud tan grande, puede causar otros problemas, como agua de sabor amargo y formación de incrustaciones o depósitos en el interior de las tuberías y en los platos y utensilios (Oram, The pH of Water, 2021).

A1.2. Sensor de sólidos disueltos totales

Los sensores de SDT funcionan al tener dos o más sondas que crean una corriente eléctrica a través de la solución acuosa en la que se sumergen. La corriente que fluye entre las sondas depende de la concentración de iones entre las sondas y, por lo tanto, también está relacionada con la diferencia de potencial entre las sondas (West, Charlton, & Kaplan, 2021). El sensor proporciona una salida de voltaje que se puede convertir en una lectura de CE y, posteriormente, en una estimación de la concentración de SDT en mg/l. A continuación, se

muestra la ecuación que relaciona el voltaje con la conductividad eléctrica en micro-Siemens/cm (DFRobot, 2021):

$$CE = 133.42VC_{25}^3 - 225.86VC_{25}^2 + 857.39VC_{25}$$

Ecuación 5. Ecuación para convertir el valor de voltaje a conductividad eléctrica en micro-Siemens/cm.

Donde VC_{25} es el valor del voltaje compensado por temperatura.

Dado que ninguna especie iónica se encuentra en una concentración significativamente grande en una muestra de agua, los iones disueltos suelen tener el mismo efecto en las lecturas de conductividad. Por tanto, la CE puede proporcionar una métrica fiable de la concentración de sólidos disueltos totales en el agua (SDT), normalmente, el valor de SDT es la mitad del valor de la conductividad eléctrica (Omega Engineering, 2021), es decir:

$$SDT = CE / 2$$

Ecuación 6. Ecuación que correlaciona la conductividad eléctrica con los sólidos disueltos totales.

Sin embargo, la conductividad eléctrica también varía alrededor del 2% por cada 1°C de temperatura, que debe normalizarse para obtener lecturas precisas. Se considera que la temperatura de referencia es de 25°C, alrededor de la temperatura ambiente, a la que se miden todos los estándares de TDS (DFRobot, 2021). Para normalizar los valores leídos por la sonda también se incorporó un sensor de temperatura, y luego se utiliza en la ecuación de normalización. El coeficiente de temperatura, un valor que relaciona el cambio de temperatura con un cambio de conductividad, se puede utilizar para normalizar todas las lecturas de conductividad a su valor de 25 ° C. Este coeficiente, α , se define como (HyperPhysics, 2021):

$$\frac{dVC}{VC} = \alpha dT$$

Esta ecuación diferencial se puede resolver para CE para obtener una ecuación que relacione el valor medido con el valor normalizado:

$$VC(T) = VC_0 e^{\alpha(T-T_0)}$$

Esto se puede estimar mediante una aproximación lineal utilizando la expansión de Taylor de la función exponencial (HyperPhysics, 2021):

$$V = VC_{25}(1 + \alpha(T - T_0))$$

Ecuación 7. Compensación por temperatura del valor del voltaje.

El coeficiente de temperatura en la aproximación linealizada se puede obtener teóricamente mediante la aplicación de la proporcionalidad de Nernst-Einstein y Stokes-Einstein (Aqion, 2018). Estos, aplicados juntos, relacionan proporcionalmente la CE y la viscosidad, que luego pueden usarse para reducir α a una constante de 0.02. La



aproximación lineal no supera un error superior a 0.25 μ S para un rango de temperaturas de 0 a 55°C, que es el límite superior de temperatura del sensor SDT.

La *Ecuación 7* se puede reducir a:

$$VC_{25} = \frac{V}{(1 + 0.02(T - 25^{\circ}C))}$$

Ecuación 8. Simplificación de la compensación del voltaje por temperatura.

Si el agua no contiene materia disuelta y es pura, no conducirá la corriente eléctrica, y por lo tanto tendrá una cifra de 0 mg/l. Por el contrario, si el agua está llena de materia disuelta, conducirá una carga, siendo la cifra de mg/l resultante proporcional al número de sólidos disueltos. Esto se debe a que todos los sólidos disueltos tienen una carga eléctrica, lo que permite la conducción de la corriente eléctrica entre los electrodos.

A continuación, se presentan algunas características técnicas del sensor de SDT proporcionadas por el fabricante (DFRobot, 2021):

Módulo placa de interfaz:

- Voltaje de entrada: 3.3 ~ 5.5 V
- Voltaje de salida: 0 ~ 2.3V
- Corriente de trabajo: 3 ~ 6mA
- Rango de medición de SDT: 0 ~ 1000mg/l
- Precisión de la medición de SDT: \pm 10% a 25 ° C

Sonda SDT:

- Temperatura de funcionamiento: 0 °C ~ 55 °C
- Numero de agujas de la sonda SDT: 2
- A prueba de agua

Es importante mencionar que la sonda no puede estar demasiado cerca del borde del recipiente, de lo contrario, afectará la lectura. La cabeza y el cable de la sonda son impermeables, pero el conector y la placa de interfaz no son impermeables.

Descripción del Pin:

- +: entrada de 5V.
- -: pin de tierra.
- A: Salida analógica de SDT



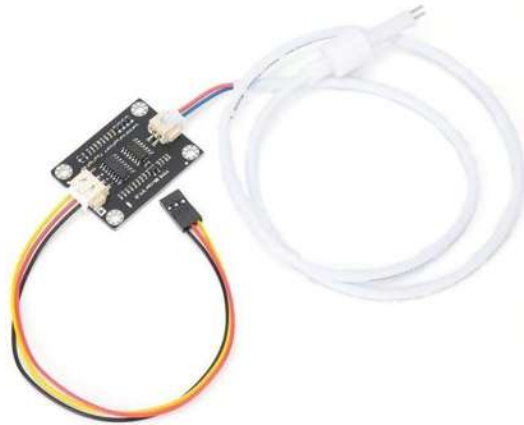


Figura 40. Sensor analógico de SDT SKU SEN0244 (DFRobot, 2021).

El límite máximo permisible de SDT en agua para uso y consumo humano es de 1000 mg/l (Secretaría de Salud y Asistencia, 2021), una concentración elevada de SDT indica que la concentración de iones disueltos pueden hacer que el agua tenga un sabor corrosivo, salado o salobre, provocar la formación de incrustaciones y disminuir la eficiencia de tuberías y los calentadores de agua (Oram, Water Testing Total Dissolved Solids Drinking Water Quality, 2021).

A1.3. Sensor de turbidez

El sensor de turbidez es un dispositivo óptico que comprende un LED (emisor de luz) y un fototransistor (receptor de luz), funciona según el principio de la transmitancia, cuando la luz pasa a través de una cierta cantidad de agua, la cantidad de luz que atraviesa depende de la cantidad de sólidos en el agua. A medida que aumenta la cantidad de sólidos, la luz que atraviesa a la muestra disminuye y el sensor mide la cantidad de luz transmitida para calcular la turbidez del agua. Esto está inversamente relacionado con la Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), uno de los estándares más comunes de medición de turbidez. El fabricante del sensor (DFRobot), proporciona una ecuación que relaciona el voltaje con la turbidez en NTU (DFRobot, 2021):

$$\text{Turbidez} = -1120.4x^2 + 5742.3x - 4352.9$$

Ecuación 9. Ecuación para convertir el valor del voltaje en turbidez, en NTU.

El límite máximo permisible de turbidez en agua para uso y consumo humano es de 5 NTU (Secretaría de Salud y Asistencia, 2021). Un valor elevado de turbidez puede causar enfermedades porque los virus o bacterias pueden adherirse a los sólidos en suspensión. Incluso los desinfectantes como el cloro o la esterilización con luz UV tienen poca eficiencia con niveles altos de turbidez. Esto se debe a que los sólidos en suspensión interfieren con los desinfectantes y actúan como escudos para los virus y bacterias (USGS, 2021).

A continuación, se presentan algunas características técnicas del sensor de turbidez compartidas por el fabricante (DFRobot, 2021):

Características técnicas del sensor de turbidez:

- Voltaje de funcionamiento: 5 V CC
- Corriente de funcionamiento: 40 mA (MAX)
- Tiempo de respuesta: <500 ms
- Resistencia de aislamiento: 100 M (mín.)
- Método de salida: analógico
- Salida analógica: 0-4,5 V
- Salida digital: señal de nivel alto / bajo (se puede ajustar el valor de umbral ajustando el potenciómetro) de salida: 0 ~ 2.3V.



Figura 41. Sensor de turbidez analógico SKU: SEN0189 (DFRobot, 2021).

A1.4. Sensor de temperatura

Para la medición de la temperatura se seleccionó una sonda DS18B20, la cual además de ser de bajo costo, se encuentra documentación relacionada con su uso en varios proyectos con Arduino, por lo que se cuenta con las librerías en el software de Arduino.

Características técnicas del sensor de temperatura:

- Rango de temperatura: -55 a 125°C.
- Precisión: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (de -10°C a $+85^\circ\text{C}$).
- Tiempo de captura inferior a 750ms.
- Interfaz 1-Wire (Puede funcionar con un solo pin).



Figura 42. Sensor de temperatura DS18B20 digital (Industrial Shields, 2021).

A1.5. Sensor de Precipitación

Para medir la cantidad de agua de lluvia se utiliza un pluviómetro tipo tipping bucket (cubeta basculante), el cual es el más utilizado en estaciones meteorológicas electrónicas, este modelo utiliza dos pequeñas “cubetas” montadas sobre un apoyo (equilibrados como un balancín), Los cubos se construyen con tolerancias muy estrictas para garantizar que contengan una cantidad exacta de precipitación. El conjunto de cubetas basculante se encuentra debajo del colector de lluvia, que canaliza la precipitación hacia las cubetas. A medida que la lluvia llena la pequeña cubeta, se desequilibra y se inclina hacia abajo, vaciándose mientras que la otra cubeta gira en su lugar para la siguiente lectura. La acción de cada evento de inflexión activa un pequeño interruptor el cual consta de un sensor de pulsos magnéticos que se encuentra fijo y en el eje del apoyo, y un imán que es el que se desplaza, que activa el circuito electrónico para transmitir el conteo al controlador (WeatherShack, 2022).

Especificaciones técnicas del pluviómetro:

- Modelo: WH-SP-RG.
- Salida: Digital.
- Material: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno).
- Interfaz 1-Wire (Puede funcionar con un solo pin).
- Temperatura máxima de tolerancia: 49°C.
- Dimensiones: 4.0 x 6.9 pulgadas.



Figura 43. Sensor de precipitación WH-SP-RG.

ANEXO 2. Diagrama de conexiones

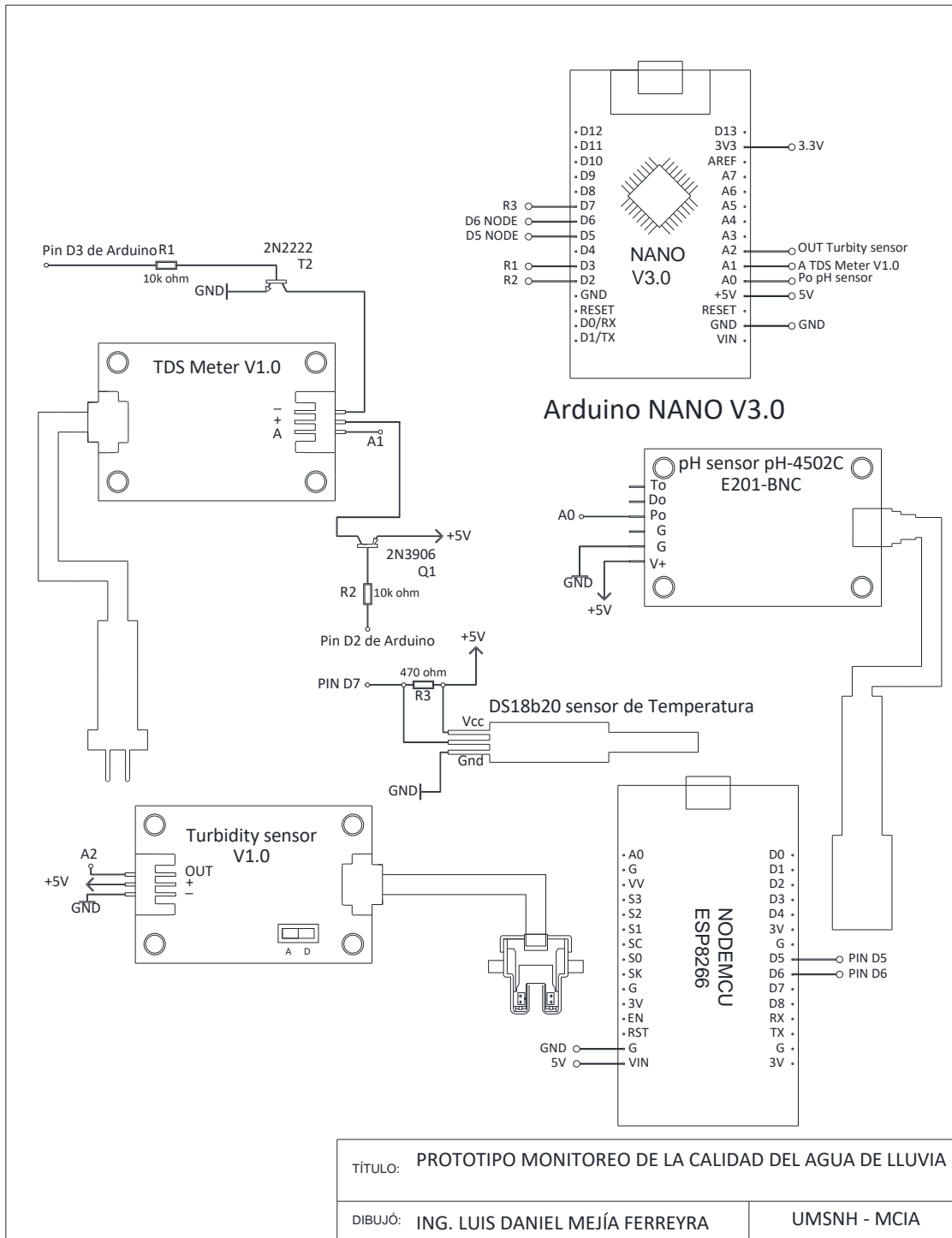


Figura 44. Diagrama de conexiones, elaboración propia.



ANEXO 3. Costo total en la construcción de una estación de monitoreo de calidad del agua de lluvia

Tabla 20. Costo total utilizando como referencia 1 USD equivalente a 20.04 MXN.

Descripción	Costo (MXN)	Costo (USD)
Arduino NANO	\$131.33	\$6.57
NodeMCU ESP8266	\$130.00	\$6.50
Cables Dupont 20 cm M-M	\$19.50	\$0.98
Cables Dupont 20 cm M-H	\$17.50	\$0.88
Cable Telefónico 4 vías 28 AWG (3m)	\$15.00	\$0.75
Sensor de Temperatura en Agua	\$55.00	\$2.75
Sensor Analógico de SDT y Conductividad	\$650.00	\$32.50
Sensor Analógico de turbidez	\$690.00	\$34.50
Sensor de pH	\$613.00	\$30.65
Kit De Resistencias	\$0.32	\$0.02
Kit De Transistores	\$1.30	\$0.07
Placa fenólica perforada	\$26.00	\$1.30
Conector Rj11 hembra (2)	\$36.00	\$1.80
Conector Rj11 macho (2)	\$6.36	\$0.32
Pines macho	\$7.00	\$0.35
Soldadura y pasta para soldar	\$8.50	\$0.43
Impresión 3D (242g de filamento PLA)	\$133.10	\$6.66
TOTAL	\$2,539.91	\$127.00

El servicio de hosting contratado en Hostinger, tuvo un costo anual de \$ 479.88 MXN, aproximadamente \$24 USD, y adicionalmente se compró un dominio, para colgar la página web, con un costo anual es de \$ 193.58 MXN, aproximadamente \$20.70 USD.

La inversión considerando las 4 estaciones construidas y el servicio de hosting da un total de \$552.70 USD. El costo de una estación de monitoreo incluyendo los costos de hosting, resulta ser de mucho menor precio en comparación con un el equipo comercial de laboratorio de menor costo, como el HI 9811-5, cuyo costo aproximado de venta ronda los \$330.00 USD (Hanna Instruments, 2021).

