



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación de un sistema *Smart Sensors* de bajo costo para el monitoreo de la escorrentía superficial**

**Diana Catalina Beltrán Huertas**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia

2024

# **Evaluación de un sistema *Smart Sensors* de bajo costo para el monitoreo de la escorrentía superficial**

**Diana Catalina Beltrán Huertas**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos**

Director (a):

Ph.D. Néstor Alonso Mancipe Muñoz

Línea de Investigación:

Modelación de fenómenos y amenazas naturales

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos (GIREH)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2024

*Dedico esta tesis a mis padres, Leito y Flor, quienes desde mi infancia me sumergieron en la magia de los libros, las matemáticas y la tecnología. Mis primeros recuerdos se entrelazan con cables, condensadores y tarjetas de computadoras, la chispa que inspira este trabajo. Agradezco los valores inculcados, la fortaleza ante las adversidades y el respaldo para dedicarnos por completo a nuestros estudios.*

*A mis hermanos David y Daniel, cariñosamente apodados por nuestros padres como los "triple D" en símbolo de nuestra hermandad, los admiro profundamente por sus logros y agradezco su constante respaldo en nuestro actual desarrollo profesional.*

*A mi director, el doctor Néstor Mancipe, por su apoyo invaluable en la orientación de esta tesis de maestría y su colaboración en la búsqueda de financiamiento. Su dedicación, paciencia y vocación han transformado esta investigación en un proceso lleno de logros significativos.*

## **Agradecimientos**

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia, por el respaldo financiero obtenido a través de las convocatorias de investigación. Con mi director de tesis, logramos adquirir equipos esenciales para esta investigación y asegurar mi dedicación. Agradezco a mis compañeros de maestría, cuyo aprendizaje conjunto fue invaluable. Reconozco la colaboración de los estudiantes del semillero de proyecto eléctrica, Isaac Zarate, Paul Cuellar, Juan Felipe Parra y John Sebastián Santamaría, quienes contribuyeron significativamente a mejorar la programación, transmisión de datos y configuración del sensor. Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) de la Universidad Nacional de Colombia, y sus colaboradores por poner a disposición los equipos y el espacio para hacer todas las pruebas con los sensores.

# Resumen

## Evaluación de un sistema Smart Sensors de bajo costo para el monitoreo de la escorrentía superficial

El seguimiento de la escorrentía superficial, especialmente en relación con las estructuras que gestionan este fenómeno tales como los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), ha experimentado un notable interés en la última década. Los sensores de bajo costo han surgido como herramientas esenciales para la monitorización del agua y los SUDS, siendo empleados por diversos investigadores. Estas herramientas, han tenido una aplicación limitada en investigaciones colombianas, específicamente en el monitoreo de SUDS. Es por esto que surge la pregunta de investigación: ¿cuáles son las ventajas y desventajas de los *Smart Sensors* en el seguimiento de la escorrentía superficial y su aplicabilidad en SUDS en tiempo casi real? Para abordar esta pregunta, la presente investigación evalúa un sistema de *Smart sensor* que incluye mediciones de pH, conductividad y temperatura en escenarios tales como en laboratorio, en muestreo *in-situ* y en muestreo continuo. Los resultados obtenidos revelan que el desempeño (en términos de exactitud y precisión) del *Smart sensor* es comparable al de un multiparámetro comercial en mediciones puntuales, con un ahorro del 80% del costo. Sin embargo, se identifican desafíos en la transmisión de datos en entornos con conectividad limitada para escenarios de monitoreo continuo. Estos hallazgos indican que, si bien los sensores de bajo costo son viables para medición puntual, aún existen obstáculos para su implementación en medición continua y en tiempo real. Esta investigación no solo contribuye al avance del monitoreo de SUDS en Bogotá mediante la adopción de sensores de bajo costo, sino que también señala un potencial significativo para investigaciones futuras centradas en la mejora de la implementación en medición continua de estos sensores.

**Palabras clave:** sensor de bajo costo, multiparámetro, pH, temperatura, conductividad, Smart sensor, evaluación.

# Abstract

## **Assessment of a low-cost Smart Sensors system for surface runoff monitoring**

The surface runoff monitoring related to structures such as Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) has increased significantly in the past decade. Low-cost sensors have emerged as essential tools for water and SUDS monitoring, widely adopted by various researchers. However, these tools have seen limited application in Colombian research, specifically in SUDS monitoring. The research question to be addressed is: What are the advantages and disadvantages of Smart Sensors for monitoring surface runoff and its applicability for monitoring SUDS in near-real-time? This research evaluates a Smart Sensor system for measuring pH, conductivity, and temperature in scenarios such as: laboratory, in-situ sampling, and continuous monitoring. The results point out that the Smart Sensor's performance is similar to that of a commercial multiparameter for punctual monitoring, saving 80% of its cost. However, challenges in data transmission are identified for environments with limited connectivity in continuous monitoring circumstances. These findings suggest that while low-cost sensors show promise for punctual measurements, obstacles persist for continuous and real-time implementation. This research not only contributes to advance in SUDS monitoring in Bogotá by using low-cost sensors but also demonstrates its potential for future research to enhance implementation of continuous monitoring of these type sensors.

**Keywords:** Low-cost sensor, Multiparameter, pH, Temperature, Conductivity, Smart sensor, Assessment.

# Contenido

	Pág.
Resumen .....	V
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas .....	1
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	2
Introducción .....	3
<b>1. Capítulo 1: Marco de referencia .....</b>	<b>7</b>
1.1 Calidad del agua de escorrentía urbana.....	7
1.2 Sensores para medir la calidad del agua.....	8
1.3 ¿Cómo se puede capturar y almacenar la información de los sensores de bajo costo?: Sistemas embebidos como solución del IoT .....	10
1.4 Sensores de bajo costo para el monitoreo puntual .....	13
1.5 Implementación de los equipos de bajo costo y los IoT en los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).....	15
1.6 Evaluación de los equipos de bajo costo en el monitoreo de la escorrentía superficial y los SUDS .....	16
<b>2. Capítulo 2: Diseño Metodológico .....</b>	<b>21</b>
<b>3. Capítulo 3: Configuración del sistema de bajo costo del agua tipo <i>Smart Sensor</i>.....</b>	<b>24</b>
3.1 Configuración del equipo Smart Sensor .....	25
3.1.1 Selección de los sensores de bajo costo y configuración del equipo Smart Sensor.....	25
3.1.2 Configuración del sensor y el multiparámetro .....	27
3.1.3 Calibración del equipo Smart sensor (SS) y del multiparámetro (MP).....	29
• Calibración del equipo Smart Sensor (SS).....	29
• Calibración del multiparámetro (MP).....	30
3.2 Evaluación del desempeño del SS frente al MP .....	30
3.2.1 Escenario 1: Pruebas en laboratorio .....	31
• Análisis de los resultados con respecto a las soluciones buffer .....	31
3.2.2 Escenario 2: Pruebas en campo con cuerpos de agua superficiales y en laboratorio con mejoras en el SS.....	35
• Datos después de las mejoras en el SS .....	38
3.2.3 Evaluación de la precisión y la exactitud de los resultados .....	40
3.2.4 Incertidumbre de los datos después de las mejoras .....	41
<b>4. Capítulo 4: Evaluación del desempeño del sistema de monitoreo en condiciones reales de campo.....</b>	<b>43</b>
4.1 Punto para pruebas del monitoreo puntual.....	44
4.2 Datos recopilados en campo .....	45
4.3 Datos recompilados en campo para el monitoreo puntual .....	46
Diferencias entre los datos del SS y el MP.....	48

4.4	Análisis adicionales con el sensor de conductividad .....	50
4.5	Versión final del equipo SS para medición puntual. ....	51
4.6	Ventajas y desventajas del equipo SS final para monitoreo puntual .....	52
<b>5.</b>	<b>Capítulo 5: Implementación del sensor de bajo costo en un caso de estudio ..</b>	<b>55</b>
5.1	Selección del punto de monitoreo .....	56
5.2	Captura y transmisión de los datos .....	58
5.3	Datos recopilados en campo.....	62
5.3.1	Monitoreo y fallas generadas durante el monitoreo .....	63
5.3.2	Evaluación del desempeño del equipo para el mes de octubre de 2023 .....	64
5.4	Desempeño de la estructura monitoreada .....	71
5.5	Ventajas y desventajas del equipo SS-IoT para monitoreo continuo .....	74
5.6	Oportunidades de mejora y trabajo a futuro que se le pueden realizar al SS-IoT 75	
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>77</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo A: Código de programación para muestreo puntual <i>Smart Sensor</i> .....</b>	<b>80</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo B: Datos tomados en laboratorio .....</b>	<b>83</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo C: Datos tomados en la campaña de monitoreo en campo con el SS y el MP</b>	<b>85</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo D: Código de programación para muestreo continuo <i>Smart Sensor</i> .....</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>92</b>

# Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa con la ubicación de estudios de sensores de bajo costo en el mundo. ....	9
Figura 2. Ejemplos de sensores de bajo costo para medir la calidad del agua .....	10
Figura 3. Sistemas embebidos. ....	11
Figura 4. Tendencia de publicaciones y citas (2013-2023) en IoT con SUDS. ....	16
Figura 5. Concepto de precisión y exactitud- .....	17
Figura 6. Diseño metodológico. ....	22
Figura 7. Resumen gráfico del capítulo 3 .....	25
Figura 8. Gravity: Analog pH Sensor/Meter Kit V2 .....	26
Figura 9. Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor /Meter V2 (K=1) .....	26
Figura 10. Gravity: Waterproof DS18B20 Temperature Sensor Kit .....	27
Figura 11. Hanna HI 9829 .....	27
Figura 12. Conexión de los sensores al sistema embebido .....	28
Figura 13. Paso a paso para la calibración del equipo Smart sensor.....	30
Figura 14. Boxplot para el SS y el MP de los % de diferencia con la variable de pH .....	33
Figura 15. Boxplot para el SS y el MP de los % de diferencia con la variable de EC .....	33
Figura 16. <i>Boxplot</i> para el SS y el MP de la variable de temperatura .....	35
Figura 17. Mapa puntos de agua superficial del campus .....	36
Figura 18. Valores de pH de los puntos muestreados .....	37
Figura 19. Valores de EC de los puntos muestreados. ....	37
Figura 20. Valores de Temperatura de los puntos muestreados.....	37
Figura 21. Boxplot para el SS mejorado y el MP con la variable de pH .....	39
Figura 22. Boxplot para el SS mejorado y el MP con la variable de EC .....	39
Figura 23. <i>Box-plot</i> para el SS y el MP con la variable de temperatura .....	40
Figura 24. Resumen gráfico del capítulo 4 .....	43
Figura 25. Tanques de agua lluvia del campus de la UNAL .....	44
Figura 26. Tanque de agua lluvia de bellas artes. ....	44
Figura 27. Toma de datos en campo .....	45
Figura 28. Diferencias entre el MP y el SS para cada evento monitoreado. ....	46
Figura 29. Eventos seleccionados .....	47
Figura 30. Diferencia entre los datos del MP y el SS .....	48
Figura 31. Concentraciones obtenidas con el SS .....	51
Figura 32. Componentes internos del equipo .....	52
Figura 33. Prototipo final del SS .....	52
Figura 34. Resumen gráfico capítulo 5 .....	56

Figura 35. Rain Barrel .....	57
Figura 36. Vista aérea del sistema de recolección del agua lluvia.....	57
Figura 37. Diseño del sistema de recolección de agua lluvia .....	58
Figura 38. Equipo SS-IoT. (a) Caja principal con el sistema embebido y circuito de conexión, (b) sensores de pH, EC y Temp que fueron sumergidos en el Rain Barrel y (c) sensor de nivel.....	60
Figura 39. Sensor Medidor De Distancia Ultrasonido Hc-sr04.....	60
Figura 40. Esquema para el monitoreo continuo con el equipo SS-IoT. ....	61
Figura 41. Nube gratuita de datos fl{ }.....	62
Figura 42. Categorización de los errores presentados por el equipo.....	65
Figura 43. Datos obtenidos por el SS para pH .....	66
Figura 44. Datos obtenidos por el SS para conductividad .....	67
Figura 45. Datos obtenidos para temperatura del mes de octubre .....	68
Figura 46. Datos obtenidos del SS para niveles.....	69
Figura 47. Datos filtrados para el monitoreo continuo entre el 18 y 24 de octubre .....	72

# Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Comparación entre los sistemas embebidos Arduino Uno y ESP32 .....	11
Tabla 2. Artículos en donde se usaron sensores de bajo costo (Smart Sensors). .....	13
Tabla 3. Sensores de bajo costo seleccionados .....	26
Tabla 4. Multiparámetro utilizado en las pruebas de laboratorio .....	27
Tabla 5. Comandos de calibración sensores .....	29
Tabla 6. Prueba de Shapiro-Wilk para los porcentajes de diferencia de los parámetros. 32	
Tabla 7. Análisis de Kruskal-Wallis de los parámetros con el SS y el MP.....	33
Tabla 8. Análisis estadístico de los datos tomados para pH, EC y Temp con el SS y el MP .....	34
Tabla 9. Prueba de Shapiro-Wilk después de las mejoras.....	38
Tabla 10. Análisis de Kruskal-Wallis del escenario 2 con el SS y el MP. ....	38
Tabla 11. Análisis estadístico de los datos tomados para el SS mejorado y el MP .....	40
Tabla 12. Métricas para calcular la precisión y exactitud del equipo.....	41
Tabla 13. Incertidumbre de los datos del SS .....	42
Tabla 14. Incertidumbre de los datos del MP .....	42
Tabla 15. Test Shapiro-Wilk de la campaña de monitoreo.....	47
Tabla 16. Test de Kruskal-Wallis de las diferencias significativas entre SS y MP .....	48
Tabla 17. Métricas para comparar los valores del MP con el SS .....	49
Tabla 18. Datos capturados en laboratorio a diferentes concentraciones de conductividad .....	50
Tabla 19. Ventajas y desventajas del equipo SS desarrollado para monitoreo puntual ..	53
Tabla 20. Criterios para la selección del sistema embebido que permitiera aplicaciones IoT.....	59
Tabla 21. Sensor de nivel.....	60
Tabla 22. Bitácora de los meses monitoreados .....	63
Tabla 23. Falla presentada por categoría para el parámetro de pH.....	66
Tabla 24. Falla presentada por categoría para el parámetro de conductividad.....	67
Tabla 25. Falla presentada por categoría para el parámetro de temperatura .....	69
Tabla 26. Fallo presentado por categoría para el parámetro de nivel .....	70
Tabla 27. Resumen de las fallas para cada parámetro.....	71
Tabla 28. Características de los eventos de lluvia muestreados.....	73
Tabla 29. Ventajas y desventajas el SS en monitoreo continuo.....	74

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Abreviaturas relacionadas con los equipos

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
--------------------	----------------

<i>SS</i>	Equipo de bajo costo, "Smart sensor"
<i>MP</i>	Equipo multiparámetro

### Abreviaturas relacionadas con los parámetros medidos

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
--------------------	----------------

<i>pH</i>	Potencial de hidrógeno
<i>EC</i>	Conductividad eléctrica
<i>Temp</i>	Temperatura
<i>Ni</i>	Nivel

### Otras abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
--------------------	----------------

<i>IoT</i>	Internet de las cosas
<i>SUDS</i>	Sistemas urbanos de drenaje sostenible

## Introducción

El monitoreo del recurso hídrico busca entender los diferentes componentes del ciclo hidrológico, sus procesos y afectaciones en cuanto a calidad y cantidad por efecto de las actividades socioeconómicas y antrópicas (Ideam & Invemar, 2021). En zonas urbanas el ciclo hidrológico incluye los sistemas de acueducto, alcantarillado, plantas de tratamiento e incluso los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), los cuales también son de interés en ser monitoreados. Dentro del ciclo hidrológico urbano la escorrentía urbana constituye en muchos casos un gran problema en las ciudades debido a que se ha demostrado que contiene contaminantes que pueden ser arrastrados desde las superficies impermeables hasta llegar a los cuerpos de agua receptores tales como ríos y canales (Berndtsson, 2010) (Lakshmikantha et al., 2021). Es por esto, que monitorear la calidad de la escorrentía dentro del ciclo hidrológico urbano sea de gran interés para investigadores, entidades públicas y empresas privadas, especialmente la escorrentía manejada mediante los SUDS (SDA, 2020). De igual manera, los sensores de bajo costo pueden ser una herramienta que permite generar nuevo conocimiento realizando investigaciones colectivas, participativas y abiertas. Esto se denomina “*Ciencia Ciudadana*” y se puede apoyar de los sensores de bajo costo al permitir que las comunidades puedan tomar datos de los cuerpos de agua de los cuales se abastecen para conocer su calidad.

El proceso de monitoreo de la calidad del agua convencionalmente implica la recopilación manual o automática de muestras de agua en el punto de interés, seguido de pruebas y análisis en laboratorio. Este proceso suele ser ineficiente, intensivo en mano de obra, consume mucho tiempo y resulta en demoras significativas para obtener los resultados en comparación con sistemas que obtengan información *in-situ* instantánea o en tiempo real (Abbas et al., 2017; Ahmed et al., 2020; Malek et al., 2023). Si bien los métodos convencionales de medición de la calidad del agua muestran ser efectivos en cuanto a

precisión y exactitud, por otro lado, suelen ser lentos, costosos y requieren experiencia especializada. Estas desventajas plantean un cambio de paradigma en nuestra aproximación a la monitorización y gestión de la calidad del agua de escorrentía urbana en SUDS, donde tener mediciones en campo de múltiples ubicaciones puede ser más importante que tratar de caracterizar de manera precisa y exacta muchos parámetros fisicoquímicos de pocos sitios (Barbosa et al., 2012). Es por esto, que surge la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los sensores de bajo costo o *Smart Sensors* de calidad del agua para ser utilizados en el monitoreo de la escorrentía superficial urbana en tiempo casi-real y de manera continua frente a equipos comerciales calibrados mediante técnicas estandarizadas? El trabajo realizado por Chen et al. (2023) sirve como punto de partida para nuestra exploración. En este artículo se dilucida la prometedora intersección de las tecnologías de internet de las cosas (IoT) y SUDS para el manejo de aguas pluviales con el fin de renovar la gestión urbana de la escorrentía. Este estudio, no solo destaca la creciente colaboración internacional, sino que también identifica a Estados Unidos, Canadá, Italia, China y Australia como contribuyentes fundamentales en el ámbito de los SUDS mejorado por IoT. Este autor subraya el potencial de las tecnologías de IoT en la revolución de aplicaciones de monitoreo en SUDS tales como: techos verdes, tanques de lluvia, zonas de bioretención, entre otros. La integración de IoT mejora la eficiencia y el control en tiempo real, pero también revela desafíos como el monitoreo avanzado, la optimización predictiva, la escalabilidad y el análisis costo-beneficio. Por lo tanto, los SUDS pueden operar de manera más eficiente utilizando parámetros monitoreados en línea como caudales de entrada/salida y concentraciones para contaminantes específicos (Rizzo et al., 2020), donde la gestión óptima de las estructuras se logra mediante la aplicación combinada de control en tiempo real de la cantidad y calidad de la escorrentía con los SUDS (Chen et al., 2023). Esto quiere decir que a nivel internacional se ha estado trabajando en la implementación de tecnología para el monitoreo del agua en diferentes campos como los SUDS.

En Colombia se ha estudiado el impacto que puede tener la implementación de los SUDS, en el cual Bogotá ha sido un caso de estudio de interés de varios investigadores (Giraldo et al., 2019). Sin embargo, poco se ha explorado en el país en el uso de tecnologías de bajo costo y IoT para el monitoreo de estas estructuras, lo cual muestra un campo interesante de investigación por explorar. Es por esto por lo que se busca encontrar herramientas de bajo costo que puedan ser efectivas para el monitoreo puntual y continuo

de la calidad de la escorrentía superficial con el fin que pueda ser utilizados en estructuras que tratan la escorrentía como los SUDS.

Teniendo en cuenta todo lo descrito anteriormente, en la presente investigación se plantea como objetivo general evaluar el desempeño de un sistema *Smart Sensors* de bajo costo que apoye el monitoreo de la calidad de escorrentía superficial, en especial evaluar su potencial de implementación en el monitoreo de SUDS para la ciudad de Bogotá. Para dar cumplimiento a dicho objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Configurar un sistema de bajo costo con sensores tipo *Smart Sensor* que permita monitorear la escorrentía superficial.
2. Evaluar el desempeño del sistema de monitoreo en condiciones reales de campo frente a un equipo comercial calibrado.
3. Implementar el sistema de *Smart Sensors* en un caso de estudio que requiera el monitoreo de la escorrentía superficial con el fin de ser utilizado en modelos matemáticos o entender el desempeño del sistema hídrico.

El alcance de la investigación es determinar si los sensores de bajo costo que se consiguen en Colombia pueden ser de utilidad en el monitoreo de la calidad de la escorrentía urbana e implementarlo en un caso de estudio específico. Se busca determinar los retos y las ventajas del uso de estos sensores y cuáles serían los campos de aplicación de este tipo de tecnologías.

El presente documento está dividido en 6 capítulos. El primer capítulo de marco de referencia pretende dar un contexto al lector frente a la investigación realizada y los conceptos teóricos claves de la investigación. El segundo capítulo muestra de manera general la metodología desarrollada en la presente investigación para contextualizar al lector de las actividades realizadas en el proyecto y la manera en cómo fueron ejecutadas. Los capítulos tres, cuatro y cinco responden a cada uno de los objetivos específicos de la presente investigación. En cada uno de los capítulos se discrimina el diseño experimental realizado, los resultados obtenidos y el análisis correspondiente de cada objetivo planteado. El capítulo sexto muestra las conclusiones y recomendaciones relacionadas a la presente investigación.



# 1. Capítulo 1: Marco de referencia

El contexto del monitoreo en el recurso hídrico y la escorrentía es amplio, el cual es relativo a la fuente u origen del agua que quiere monitorearse. Para el caso de esta investigación, la escorrentía superficial urbana es la fuente por analizar, en especial la que pueda ser tratada por un SUDS. Este tipo de estructuras presentan varios retos en su operación normal, entre los cuales se encuentra el seguimiento y monitoreo de la calidad de la escorrentía que tratan. Es por esto, que el uso de sensores para determinar la calidad del agua son parte fundamental del monitoreo del recurso agua.

En las últimas décadas se ha evaluado el uso de tecnologías de bajo costo que puedan ser una herramienta de apoyo para el seguimiento y control de diferentes estructuras como los SUDS (Chen et al., 2023). La presente investigación atiende esta problemática y a continuación se presentan los diferentes fundamentos teóricos y conceptuales que son la base de la investigación. Igualmente se presentan algunos casos de estudio y antecedentes en donde se han implementado sensores de bajo costo y tecnologías IoT para el seguimiento de la escorrentía superficial.

## 1.1 Calidad del agua de escorrentía urbana

Dentro del ciclo del agua, se destacan varios procesos cruciales, como la evaporación, transpiración, condensación, precipitación, escorrentía, infiltración, aguas subterráneas y acumulación (IDEAM, s.f.). La escorrentía superficial se refiere al flujo de agua dulce que, en forma líquida o sólida, cae sobre la superficie terrestre y se desplaza hasta alcanzar ríos o quebradas (siendo rural), o incluso las áreas urbanas al deslizarse por las vías (siendo urbana). Sin embargo, esta escorrentía puede verse afectada en calidad y cantidad debido a actividades humanas, urbanización, canalización de ríos, entre otros factores. Por tanto, resulta crucial monitorearla para llevar a cabo una gestión integral del recurso hídrico (GIRH), especialmente mediante herramientas como la modelación matemática de la escorrentía superficial, lo que permite un seguimiento, control y vigilancia adecuados.

El monitoreo del agua requiere que se tengan en cuenta algunos aspectos claves como: [1] identificar los objetivos del monitoreo, [2] Seleccionar las métricas e indicadores de desempeño y [3] seleccionar los métodos de medida, herramientas y sensores apropiados (Kumar et al., 2021). Sin embargo, aún existen retos para obtener datos de algunos parámetros de calidad del agua, para lo cual algunos investigadores están usando métodos basados en sensores de bajo costo para tal fin (Linjama et al., 2009).

En las últimas décadas el monitoreo del recurso agua y por ende de la escorrentía superficial se apoya en la información obtenida de productos de sensores y la toma de datos en campo. De los productos de sensores remotos se puede obtener información temporal y espacial de variables tales como precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo, entre otras y del monitoreo en campo se puede obtener datos instantáneos de estas variables. Para obtener los datos en campo se requieren equipos comerciales que suelen ser costosos y complejos de utilizar si se busca realizar un monitoreo en tiempo real y continuo (Lessels & Bishop, 2020). Una posible solución para el monitoreo continuo es la implementación de sensores de bajo costo (Liu et al., 2012) (Murphy et al., 2015) y varios autores han creado sus propios sistemas de smart sensors para el monitoreo del recurso agua en cuanto a cantidad y calidad.

## **1.2 Sensores para medir la calidad del agua**

El monitoreo de calidad del agua de escorrentía en SUDS es necesario que sea rápido, preciso y a bajo costo, en especial en áreas donde se requiere masificar la implementación de SUDS o en donde sea pertinente el monitoreo de la escorrentía. El reto es lograr diseñar equipos de sensores que permitan monitorear la calidad del agua a bajo costo y fácil de usar en parámetros como el pH, temperatura, conductividad y otros (Ahmed et al., 2020). Esto con el fin de realizar monitoreo puntual y monitoreo continuo al conectar los sensores de bajo costo al IoT. El IoT permitiría compartir la información de los sensores, visualizarla y generar incluso alertas al usuario por medio de páginas web o plataformas similares.

En la actualidad existen multiparámetros, con diferentes tipos de sensores comerciales que miden algunos parámetros del agua en campo. Estos equipos poseen sensores que normalmente miden el pH, la conductividad, la temperatura, el oxígeno disuelto, entre varios parámetros adicionales que pueden ser configurados de acuerdo con las

necesidades del usuario. Uno de los fabricantes de estos equipos es Hanna con equipos como el HI 9829 que es un medidor multiparámetro de registro, portátil y a prueba de agua que controla hasta 14 parámetros diferentes de calidad del agua. Algunas de las especificaciones de estos equipos en torno a los sensores de pH, conductividad y temperatura que muestran diferentes precisiones y resoluciones de acuerdo con cada uno de los parámetros (HANNA, 2023). Muchas empresas comerciales han creado equipos para recolectar la información en tiempo real y de manera continua, que permiten transmitir datos y almacenarlos. Sin embargo, estas funciones están disponibles a costos muy elevados y que usualmente dependen de plataformas que son exclusivas para su implementación (Malek et al., 2023).

Por otro lado, en temas de equipos de bajo costo se observa que Asia es uno de los continentes que más ha trabajado en el uso de estas tecnologías para el monitoreo del agua (ver Figura 1) y los cuales en su gran mayoría se han realizado a escala de laboratorio.



Figura 1. Mapa con la ubicación de estudios de sensores de bajo costo en el mundo.

Fuente: Compilado por la autora.

El mapa de la Figura 1 se elabora teniendo en cuenta diversas investigaciones donde se han construido diferentes prototipos de sensores de bajo costo para diferentes aplicaciones como el monitoreo de tuberías, ríos, etc. Los parámetros de calidad del agua que más monitorearon los autores con sensores de bajo costo son pH, conductividad, temperatura y turbiedad. Esto puede deberse a que son los sensores que se encuentran más frecuentemente en el mercado y a bajos costos. A la par del uso de los sensores de

bajo costo se ha visto que el IoT ha transformado el monitoreo de la calidad del agua y la gestión de aguas pluviales. Las tecnologías IoT alteran fundamentalmente la forma en que recopilamos, analizamos y actuamos sobre los datos, ofreciendo soluciones más rentables, en tiempo real y precisas. Se han desarrollado algunos sensores para explorar datos de calidad del agua tales como: SmartCoast (O'Flynn et al., 2007), Open storm (Bartos et al., 2018), GatorByte (Agade & Bean, 2023), EmerSense (Poquita-Du et al., 2023) y LakeNet (Seders et al., 2007). La Figura 2 muestra algunos de estos equipos mencionados. Estos sensores miden parámetros como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la turbidez, el nivel del agua, en los cuales utilizan sistemas inalámbricos para transmitir información y sistemas embebidos como Arduino® como registrador de datos. Sin embargo, son pocos los estudios que a la fecha hacen uso de sensores de bajo costo, la adopción de IoT y existe muy poca orientación sobre cómo deberían construirse los sensores de bajo costo y unirlos con el IoT (Bartos et al., 2018) (Almetwally et al., 2020).



Figura 2. Ejemplos de sensores de bajo costo para medir la calidad del agua

Fuente: Autora adaptado de (O'Flynn et al., 2007)(Bartos et al., 2018)(Agade y Bean, 2023)

### 1.3 ¿Cómo se puede capturar y almacenar la información de los sensores de bajo costo?: Sistemas embebidos como solución del IoT

En los equipos de bajo costo, luego de que resolvemos la incógnita de que medir para determinar la calidad del agua y con qué sensores se pueden hacer estas mediciones, la pregunta que surge es: ¿cómo podemos leer esta información? A nivel comercial y a bajo

costo los sistemas embebidos han evolucionado en las últimas décadas. La Figura 3 muestra parte de la evolución de estos sistemas embebidos utilizados en diversas investigaciones donde se miden parámetros de calidad del agua. Los primeros equipos únicamente podían leer la información de los sensores con pocos puertos analógicos y digitales. En la actualidad equipos recientes como el ESP32 ya traen sistemas de comunicación incorporados tales como el *wifi* y el *bluetooth* para transmitir los datos en tiempo real. En muchos casos estos sistemas embebidos cuentan con un mayor número de puertos digitales y analógicos que facilitan la instalación de varios sensores. Es por esto por lo que cada vez se logra configurar equipos más compactos y con mayor versatilidad para ser ajustados a las necesidades del usuario.

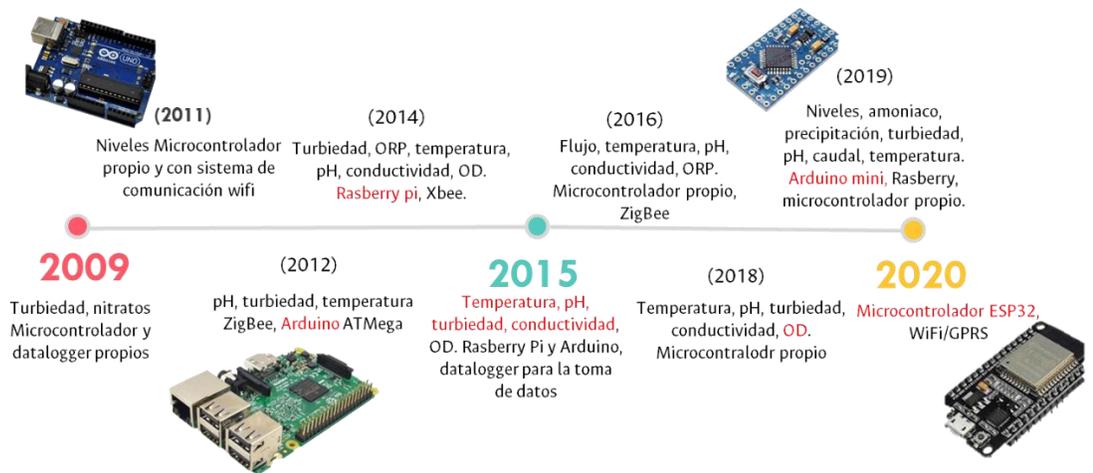


Figura 3. Sistemas embebidos.

Fuente: Autora

Debido a que la presente investigación se enfoca en el uso del Arduino Uno y el ESP32 como sistemas embebidos, en la Tabla 1 se muestra una tabla comparativa de las características que contiene cada uno de estos.

Tabla 1. Comparación entre los sistemas embebidos Arduino Uno y ESP32

Equipo	Arduino Uno	ESP32
Características generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microcontrolador: ATmega328P</li> <li>- Velocidad de reloj: 16 MHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procesador de doble núcleo a 240 MHz</li> <li>- Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2 integrado</li> </ul>

<b>Equipo</b>	<b>Arduino Uno</b>	<b>ESP32</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos</li> <li>- Memoria: 32 KB Flash (0,5 para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memoria RAM de 520 KB y flash de 4 MB</li> <li>- Admite CAN, Ethernet y SDIO</li> <li>- Admite múltiples protocolos de comunicación, incluidos SPI, I2C, UART, ADC y DAC</li> <li>- 16 canales PWM.</li> </ul>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de usar y programar.</li> <li>- Gran comunidad de soporte y tutoriales</li> <li>- Bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procesador de 32 bits permite la realización de proyectos más complejos</li> <li>- WiFi integrado</li> <li>- Capacidad de almacenamiento más grande que el Arduino Uno.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procesador de dos núcleos permite la realización de proyectos más complejos</li> <li>- WiFi y Bluetooth integrados</li> <li>- Capacidad de almacenamiento más grande que el Arduino Uno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menos soporte y tutoriales que el Arduino Uno</li> <li>- Programación más compleja que el Arduino Uno</li> <li>- Precio ligeramente más alto que el Arduino Uno.</li> </ul>
Aplicación potencial en al monitoreo de la escorrentía urbana	Monitoreo puntual de cuerpos de agua, encharcamientos, entrada y salida de SUDS.	Monitoreo continuo de la escorrentía urbana a través de estructuras de control a la entrada y salida de SUDS.

Fuente: Autora

De la Tabla 1 se puede inferir que hay una aplicabilidad de estos dispositivos en el monitoreo de la escorrentía siendo el Arduino Uno el que mayor potencial presenta para el monitoreo puntual y el ESP32 para el monitoreo continuo. A pesar de que ambos dispositivos estarían en la capacidad de adaptarse a cualquiera de los dos escenarios (i.e. monitoreo puntual o continuo) se propone que cada equipo se use en una aplicación diferente debido a que puede generar beneficios en reducción de costos de acuerdo con la necesidad que se tenga del monitoreo. Una de las mayores ventajas de estas aplicaciones es que son adaptables y que en la medida en la que salgan nuevas

tecnologías se puede actualizar y modificar a menor costo que el de adquirir nuevos equipos comerciales.

## 1.4 Sensores de bajo costo para el monitoreo puntual

Para fines de la siguiente investigación se entiende como sensores y/o equipos de bajo costo aquellos que pertenecen a tecnologías relativamente nuevas y que miden parámetros del agua in-situ (e.g. pH, conductividad, temperatura), donde su costo es mucho menor al compararlo con los sensores y/o equipos que se usan de manera tradicional para medir estos parámetros como los multiparámetros. La Tabla 2 muestra algunos de los desarrollos que se han hecho en los últimos años frente a el uso de sensores de bajo costo en monitoreo puntual. De estas investigaciones se destaca que Asia es uno de los continentes más activos en el área del monitoreo del agua, con la mayoría de los estudios realizados en laboratorio y utilizando sensores instalados en tuberías, acuarios, cultivos de peces y ríos. Los parámetros de calidad del agua más monitoreados incluyen pH, conductividad, temperatura y turbidez, posiblemente debido a su disponibilidad y bajo costo en el mercado. Además, un 36% de los estudios combinan el monitoreo de cantidad y calidad del agua, mostrando un área de investigación poco explorada con potencial. Los sistemas embebidos y de comunicación varían entre los autores, pero se están adaptando a tecnologías recientes, como el ESP32, que reemplaza al Arduino por su menor consumo de energía y Wi-Fi integrado. La transmisión de datos se realiza principalmente a través de Wi-Fi, como destacado en estudios que comparan diferentes métodos de transferencia de datos. Sin embargo, en estos estudios no se observa una comparación de los resultados obtenidos por los equipos frente a equipos como los multiparámetros, esto abre una posibilidad de investigación interesante y que se busca atender en esta tesis de investigación.

Tabla 2. Artículos en donde se usaron sensores de bajo costo (Smart Sensors).

<b>Autor</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Sistema embebido y de comunicación</b>
(Linjama et al., 2009)	Finlandia	Turbiedad, nitratos	Microcontrolador y datalogger propios
(Liu et al., 2011)	Estados Unidos	Niveles del agua	Microcontrolador propio y con sistema de comunicación wifi

<b>Autor</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Sistema embebido y de comunicación</b>
(Rasin & Rizal Abdullah, 2012)	Malasia	pH, turbiedad, temperatura	ZigBee, Arduino ATmega
(Lambrou et al., 2014)	Nicosia	Turbiedad, ORP, temperatura, pH, conductividad, OD	Raspberry pi, XBee
(Murphy et al., 2015)	Dublín	Turbiedad	Raspberry Pi y Arduino, datalogger para la toma de datos
(Vijayakumar & Ramya, 2015)	Namakkal, India	Temperatura, pH, turbiedad, conductividad, OD	Raspberry Pi 3
(Cloete et al., 2016)	Pretoria, Sur África	Caudal, temperatura, pH, conductividad, ORP	Microcontrolador propio, ZigBee
(Salim et al., 2017)	Indonesia, Asia	Oxígeno disuelto, pH, temperatura	Raspberry Pi3, Wifi, Bluetooth
(Parra et al., 2018)	España	Turbiedad	Microcontrolador propio
(Fell et al., 2019)	Cape Town, Sur África	Niveles del agua, amoníaco, precipitación	Microcontrolador propio, Lora
(Assendelft & Ilja van Meerveld, 2019)	Suiza	Temperatura, caudal	Arduino mini Pro (disminuye el consumo de energía), datalogger
(Raja et al., 2019)	Chennai, India	pH, temperatura, turbiedad	Raspberry Pi3
(Ali et al., 2020)	Malasia	pH, temperatura, conductividad, turbiedad, nivel del agua	Microcontrolador ESP32, WiFi/GPRS

**Fuente: Autora**

Varias universidades en Colombia han contribuido en esta área, desarrollando sensores de bajo costo con diversas aplicaciones. Por ejemplo, Arévalo (2018) creó un prototipo económico para monitorear la calidad del agua subterránea en zonas rurales, midiendo temperatura, pH, OD y CE. Montenegro (2016) diseñó un sistema de sensores económicos utilizando tecnología capacitiva para medir OD, conductividad y pH, resaltando su eficiencia energética. La Universidad de los Andes ha desarrollado sondas de bajo costo para monitorear parámetros como pH, OD, temperatura y CE, probándolas con

comunidades locales. Sin embargo, estos estudios suelen limitarse a la selección de sensores, el desarrollo de sistemas integrados y pruebas de laboratorio. Faltan investigaciones en Colombia que comparen estas tecnologías con equipos comerciales calibrados, tanto en entornos reales como en laboratorio, utilizando técnicas y métodos estandarizados.

## **1.5 Implementación de los equipos de bajo costo y los IoT en los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)**

IoT (Internet de las cosas) significa la capacidad de hacer que todo lo que nos rodea (dispositivos, máquinas) estén conectados al internet y tengan algún tipo de comportamiento inteligente, siendo autónomos y seguros (e.g celulares, laptop). Generalmente los IoT atienden tres aspectos principales: [1] la comprensión de los usuarios y sus aplicaciones, [2] la arquitectura del software y las redes de comunicación para la transmisión de la información y [3] las herramientas de análisis en IoT que buscan hacer un sistema inteligente y autónomo (Ali., et al., 2015). En el caso de los sensores de bajo costo se pueden aplicar en los aspectos [1] y [2] mencionados previamente por medio del desarrollo de sensores que conectados a internet pueden transmitir datos a aplicaciones de usuario para visualizar información.

Luego de establecido el mercado y las posibilidades existentes para el monitoreo de la escorrentía mediante equipos de bajo costo, este numeral se enfoca en mostrar algunas de las ventajas en usar estos equipos de bajo costo en el monitoreo de SUDS basado en algunos antecedentes donde han logrado implementar IoT en estas estructuras. Se aclara que los equipos de bajo costo, que miden parámetros de calidad del agua (e.g sensores de pH, temperatura, oxígeno disuelto, etc.) conectados a sistemas embebidos (e.g. Arduino Uno o ESP32) se denominaran equipos *Smart Sensors (SS)* en la presente investigación.

Las estrategias para el manejo sostenible de los SUDS se requieren a diferentes niveles (i.e. político, regional, local) pero todos ellos requieren información. Usualmente, el agua lluvia se caracteriza por medio de medidas de caudal y toma de muestras (Barbosa et al., 2012). El monitoreo del agua requiere que se tengan en cuenta algunos aspectos claves como los objetivos del monitoreo, seleccionar las métricas e indicadores de

desempeño, seleccionar los métodos de medición, herramientas y sensores apropiados, las características del punto de monitoreo, presupuesto, entre otros (Barbosa et al., 2012) (Adla et al., 2020). Sin embargo, aún existen retos para obtener datos de algunos parámetros de calidad del agua, para lo cual algunos investigadores están usando métodos basados en sensores de bajo costo para tal fin (Linjama et al., 2009). Chen et al., (2023) muestra que la investigación en la integración de los IoT y los SUDS inicio en 2013. Desde entonces, el número de publicaciones y citas ha aumentado significativamente (ver Figura 4), destacando que Estados unidos, Canadá, Italia, China y Australia son los países en donde más publicaciones se han realizado en torno a este tema.

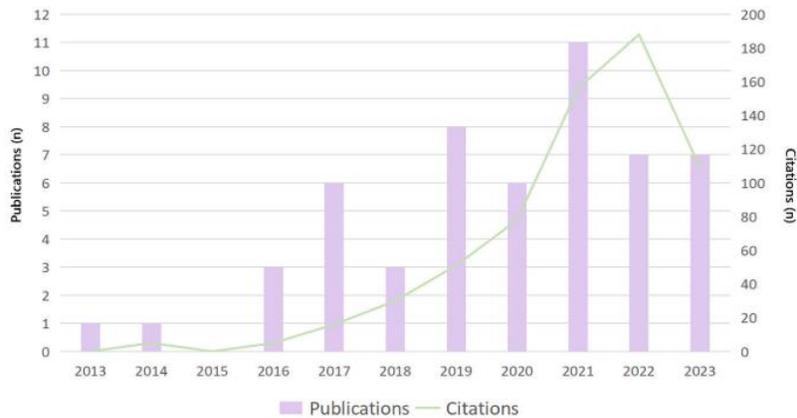


Figura 4. Tendencia de publicaciones y citas (2013-2023) en IoT con SUDS.

Fuente: Tomado de (Chen et al., 2023)

Dentro de los 145 artículos analizados por Chen et al., (2023) se identifican los siguientes retos en la implementación de IoT con los SUDS: existe la necesidad de hacer monitoreo de las estructuras SUDS y crear mecanismos de control para estas estructuras, se requiere desarrollar estrategias de optimización predictivas del monitoreo de SUDS y los requisitos para la escalabilidad en las aplicaciones como los techos verdes y los tanques de agua lluvia para generar impactos significativos.

## 1.6 Evaluación de los equipos de bajo costo en el monitoreo de la escorrentía superficial y los SUDS

Como se ha mencionado anteriormente algunos de los retos relacionados con la implementación de los equipos SS en el monitoreo del agua y de los SUDS son el número

limitado de estudios de casos comprobados y la falta de orientación sobre cómo deberían construirse estos equipos (Almetwally et al., 2020; Bartos et al., 2018). Es por esto por lo que esta investigación busca generar una orientación basada en análisis cuantitativos de como deberían ser implementados estos equipos SS. Para ello se requiere tener en cuenta algunos conceptos clave en estas tecnologías.

### Hardware y software de los equipos para medir la calidad del agua

El hardware hace referencia a la parte que se puede ver y tocar de los equipos. Es decir, todos los componentes de su estructura física. En el caso de los equipos para medir la calidad del agua se incluye los sensores que miden cada una de las variables a analizar, el sistema embebido, el sistema de cableado y componentes que se usan en la construcción del sensor. Por otro lado, el software hace referencia al programa que hace posible la ejecución de tareas específicas en un sistema como los sistemas operativos, aplicaciones, programas, entre otros. Conocer estos términos es fundamental en la configuración de un equipo SS debido a que cambios en hardware y software pueden afectar la calidad de la información que es adquirida por el equipo de medición.

### Precisión y exactitud de un equipo

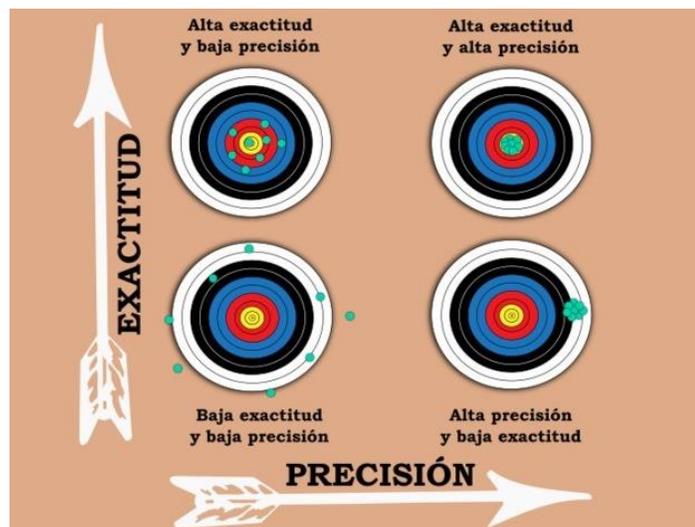


Figura 5. Concepto de precisión y exactitud-

Fuente: (Zita, 2018)

En el campo de la ingeniería, la exactitud de un equipo está representado por el grado de acercamiento de las medidas de una cantidad al valor verdadero o esperado de esa

cantidad. Por ejemplo, para un valor de pH conocido de una muestra de agua, un equipo con una buena exactitud sería el que su medición se acerque al valor conocido de pH. Por otro lado, la precisión está relacionada con la reproducibilidad y la repetibilidad. Esta se define como el grado en que la repetición de una medición muestra el mismo resultado. Para el ejemplo del valor de pH conocido, un equipo con buena precisión mostraría el mismo valor de pH al realizar la medida varias veces mientras no cambien las condiciones de la muestra (Zita, 2018). La Figura 5 muestra las diferentes combinaciones entre precisión y exactitud que pueden ocurrir en un sistema o equipo. Las ecuaciones 1 a la 4 presentan métricas comúnmente usadas para estimar la precisión y la exactitud de un sistema o equipo.

#### a) Precisión

- Error Medio Absoluto (MAE): La Ecuación 1 permite medir la diferencia promedio entre las mediciones y los valores de referencia. El error absoluto es el valor absoluto de la diferencia entre el valor previsto y el valor real (AgriMetSoft, 2019).

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{ideal} - X_{real}| \quad \text{Ecuación 1}$$

- Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE): La Ecuación 2 se utiliza para cuantificar la precisión de las mediciones, penalizando los errores más grandes. El RMSE mide cuánto error hay entre dos conjuntos de datos. En otras palabras, el error cuadrático medio puede comparar un valor esperado o ideal y un valor real o conocido que puede ser el tomado por el equipo SS (AgriMetSoft, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{real,i} - X_{ideal})^2}{n}} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Error Relativo Absoluto (RAE): La Ecuación 3 se utiliza para expresar el error en términos relativos en relación con el rango de valores de referencia (AgriMetSoft, 2019).

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{ideal} - X_{real}|}{\sum_{i=1}^n |X_{real} - \bar{X}_{real}|} \quad \text{Ecuación 3}$$

#### b) Exactitud

- Desviación Estándar de las Diferencias: La Ecuación 4 sirve para evaluar la dispersión de las diferencias entre las mediciones y los valores de referencia. Cuanto mayor sea la

desviación estándar, significa que más dispersos están los datos. Si la desviación estándar es baja quiere decir que los datos están muy cerca de su media (AgriMetSoft, 2019).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n}} \quad \text{Ecuación 4}$$



## 2.Capítulo 2: Diseño Metodológico

Para evaluar el desempeño del equipo *Smart Sensor (SS)* para apoyar el monitoreo de la calidad de la escorrentía superficial, se plantea el desarrollo de una metodología compuesta por 4 fases en donde se busca realizar un estudio analítico, con una estrategia de investigación mixta. A continuación, se describe el esquema general del diseño metodológico realizado en cada una de las fases y el diagrama de flujo correspondiente (ver Figura 6). Al inicio de cada capítulo se presenta en detalle la metodología de cada fase.

### **Fase 0. Preliminares.**

Esta fase está compuesta por actividades que sentaron las bases de esta investigación. Para ello, se requirió tener claro los siguientes aspectos: [1] sistemas embebidos y sensores de bajo costo disponibles en Colombia, multiparámetros disponibles en laboratorio para comparar los resultados; [2] puntos en donde se podría realizar el monitoreo en campo con los equipos para el monitoreo puntual y continuo; y [3] implementación de métricas estadísticas que permitan analizar y entender la información obtenida por los equipos.

### **Fase 1. Configurar un sistema de bajo costo con sensores tipo “Smart Sensor” que permita monitorear la escorrentía superficial.**

En esta fase se desarrolló el montaje del prototipo del equipo SS con el cual se realizaron los monitoreos puntuales de la escorrentía superficial. Debido a que existen varios sensores de bajo costo disponibles en el mercado se seleccionan los sensores que serán utilizados en el monitoreo basados en aspectos como precio, disponibilidad de la contraparte comercial del sensor a utilizar, rangos de medición, entre otras.

Es importante aclarar que en esta fase no se diseñó desde cero el equipo SS, sino que se configuró un equipo a partir de los sensores comercialmente disponibles en Colombia de bajo costo que se pudieran conectar a un Arduino Uno para recopilar los datos.

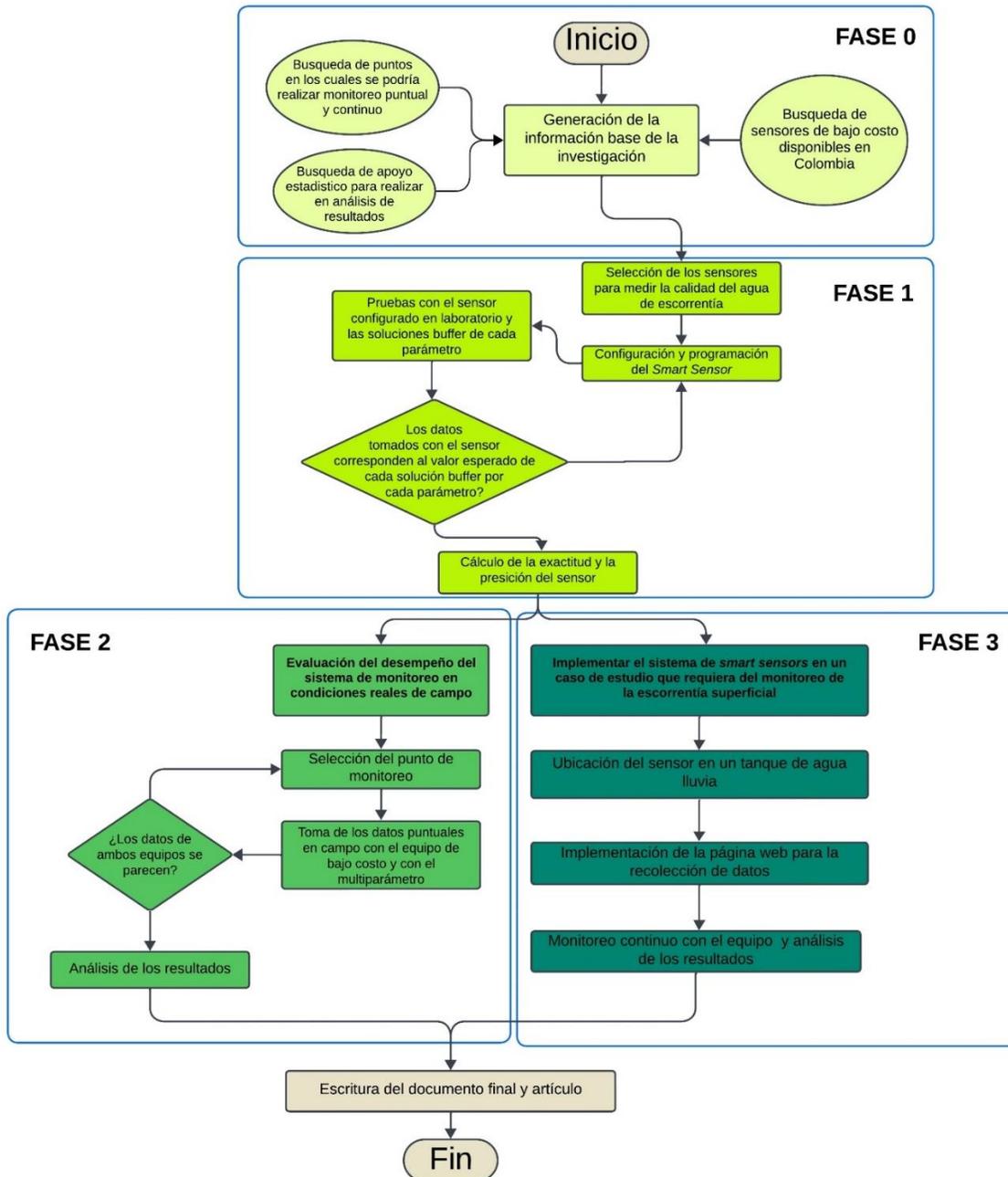


Figura 6. Diseño metodológico.

Fuente: Autora.

Luego de definidos los parámetros a monitorear y la forma en la cual se van a tomar los datos en el laboratorio se procede a hacer la compra de los sensores, montaje de prototipo, programación del SS y unas pruebas iniciales del funcionamiento del equipo diseñado.

Una vez se realiza el montaje del prototipo se realiza la calibración de los sensores y se hacen pruebas en laboratorio con las soluciones buffer de cada parámetro para determinar si se requiere realizar modificaciones en la configuración del sensor tanto de software como hardware. Para las pruebas se tiene en cuenta un multiparámetro (MP) comercial marca Hanna para comparar los datos tomados con el SS en condiciones de laboratorio. Igualmente se realiza una prueba preliminar en campo con el fin de determinar si se deben realizar mejoras a la configuración de hardware del equipo SS.

**Fase 2. Evaluación del desempeño del sistema de monitoreo en condiciones reales de campo frente a un equipo comercial calibrado.**

Luego de realizar el montaje del equipo SS de la fase 1, se procede a realizar una comparación en campo de mediciones puntuales realizadas de manera paralela junto al MP en la Universidad. Las características del punto en el cual se realizó el muestreo es que fuera de fácil acceso y que se pudieran tomar los datos con los equipos de manera paralela sin perjudicar la seguridad de quien toma los datos. La campaña de monitoreo se realiza en el tanque de agua lluvia del edificio de bellas artes del campus. Con la información capturada en ambos monitoreos se realiza un análisis de la información para determinar si los datos del *Smart sensor* y el multiparámetro son similares. Se busca determinar las ventajas y desventajas del monitoreo puntual en campo.

**Fase 3. Implementar el equipo de SS en un caso de estudio que requiera del monitoreo de la escorrentía superficial con el fin de ser utilizado en modelos matemáticos o entender el desempeño del sistema hídrico.**

En esta fase se busca poner a prueba el sensor para mediciones continuas al implementarlo en un caso de estudio específico. El sensor se instala en un "*Rain Barrel*" o tanque de lluvia tipo SUDS, ubicado en la terraza del edificio IEl para tomar datos continuos al menos por un mes con el fin de determinar las ventajas y desventajas de estos sensores en monitoreo continuo. Debido a que se realiza el monitoreo continuo se propone el uso del sistema embebido ESP32 con el fin de poder transmitir los datos a una página web. Finalmente, en esta fase se realiza el análisis de los resultados obtenidos frente al desempeño del SUDS monitoreado. Luego de ejecutar todas las fases previamente mencionadas se procede a compilar la información de los resultados en el presente documento y se plantea la escritura del artículo a partir de lo obtenido principalmente en la primera fase del presente proyecto.

### **3. Capítulo 3: Configuración del sistema de bajo costo del agua tipo *Smart Sensor***

Este trabajo partió de la búsqueda de equipos de bajo costo para medir la calidad del agua disponibles en el mercado con el fin de elegir los que de acuerdo con diferentes criterios (precio, rango de medida, precisión y resolución) puedan ser utilizados para medir esorrentía superficial de manera puntual. Luego de elegidos los sensores se realiza la conexión y programación de los sensores por medio del sistema embebido utilizado, que en este caso fue el Arduino Uno.

Este capítulo busca mostrar la configuración del equipo de bajo costo identificando los sensores a ser usados, configurar el equipo *Smart Sensor* (SS) y calibrarlo junto al equipo multiparámetro (MP). Posteriormente, se busca evaluar el desempeño del SS frente al MP en dos escenarios: [1] pruebas en laboratorio bajo condiciones controladas y [2] prueba del equipo en campo en cuerpos de agua del campus de la Universidad y posteriormente en laboratorio. Estos escenarios se realizan con el fin de determinar de manera cuantitativa si el sensor puede ser utilizado en monitoreo instantáneo de esorrentía superficial y si se deben realizar mejoras o adaptaciones en el equipo SS. En este sentido, se plantean dos análisis con la información capturada en laboratorio en donde se utilizan como puntos de comparación las soluciones estandarizadas buffer con las cuales se calibran los diferentes sensores (e.g solución *buffer* de pH 4, 7 y solución *buffer* de conductividad 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). El primer análisis está relacionado con la evaluación de la distribución de los datos y la comparación entre el equipo SS y el MP. Se tienen en cuenta un análisis de normalidad de los datos, *box-plots* y pruebas paramétricas o no-paramétricas de acuerdo con la naturaleza de los datos. En segunda instancia se realiza un análisis de la precisión y la exactitud del equipo de bajo costo e igualmente se compara con la precisión y la exactitud de un multiparámetro usando métricas como el RMSE, MAE, RAE y la desviación estándar. Para estos dos análisis se tienen en cuenta las mismas condiciones en laboratorio y en

campo tomando los datos en las mismas condiciones ambientales, los mismos recipientes, la misma solución buffer y en el mismo intervalo de tiempo. Los datos en laboratorio son capturados con cada uno de los equipos en intervalos de 2 minutos durante 20 minutos. La Figura 7 muestra el resumen gráfico del presente capítulo.

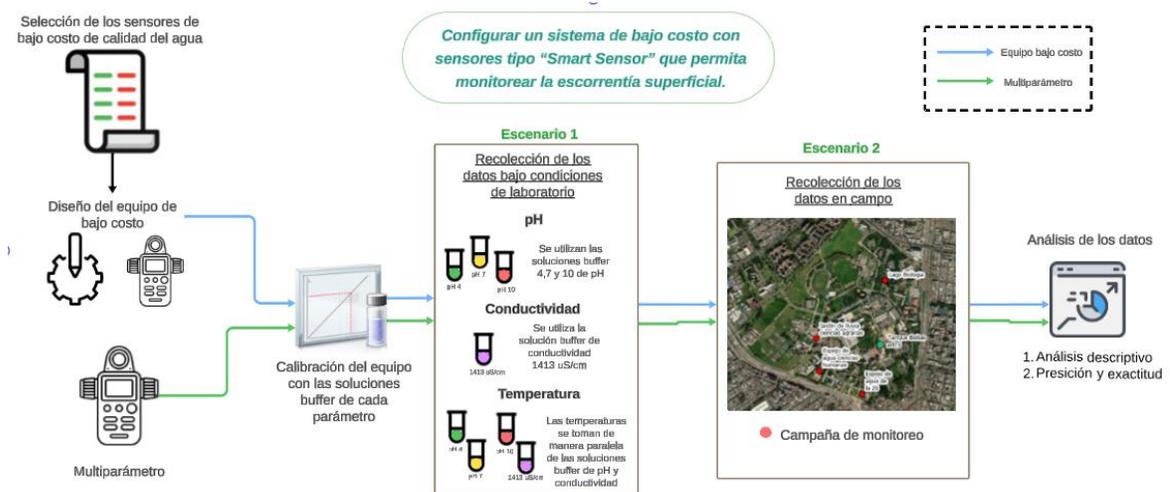


Figura 7. Resumen gráfico del capítulo 3

Fuente: Autora

## 3.1 Configuración del equipo Smart Sensor

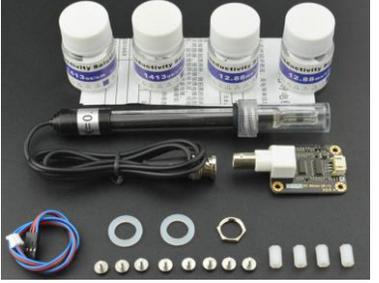
### 3.1.1 Selección de los sensores de bajo costo y configuración del equipo Smart Sensor

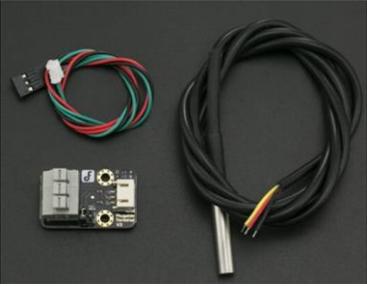
De manera inicial, se definieron los sensores de bajo costo que pudieran ser adquiridos en Colombia y que puedan ser conectados a los sistemas embebidos Arduino Uno y al ESP32. Esto debido a que uno de los propósitos del desarrollo de este equipo es que pueda ser replicado fácilmente por otros estudiantes e incluso algunas comunidades o entidades que puedan estar interesados en realizar monitoreo de pH, conductividad y temperatura a bajo costo. En esta investigación, se han tenido en cuenta los parámetros de pH, conductividad y temperatura debido a que son los sensores más frecuentemente utilizados en equipos multiparámetro para medir parámetros in situ.

Es importante tener en cuenta que se usaron las características esperadas del agua lluvia y/o escorrentía para seleccionar los sensores dados los rangos de medición que deben tener los sensores para que sean útiles en la presente investigación. Estudios del IDEAM

realizados en diferentes ciudades de Colombia entre el 2001 y el 2006 muestran que, por ejemplo, para la ciudad de Bogotá la conductividad de la lluvia varía entre 20 y 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e incluso se pueden encontrar valores mínimos de 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por otro lado, el IDEAM establece que un pH de lluvia normal es de 5.6 unidades de pH. Sin embargo, para la ciudad de Bogotá se ha presentado valores fluctuantes por encima y por debajo del pH normal de la lluvia (4.2 a 6.8 unidades de pH aproximadamente), indicando una mayor preponderancia de lluvia con carácter ácido para el periodo en el que se realizó el estudio (Ideam & Invemar, 2021). En el caso de temperatura no se encuentra con datos históricos de temperatura en el estudio analizado. Teniendo en cuenta esta información y la experiencia adquirida por la autora en diferentes estudios realizados profesionalmente sobre la calidad de la lluvia y/o escorrentía superficial, los sensores seleccionados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Sensores de bajo costo seleccionados

Parámetro	Sensor	Características
pH	 <p data-bbox="418 1241 797 1335">Figura 8. Gravity: Analog pH Sensor/Meter Kit V2 Fuente: (DFRobot, 2023)</p>	<p data-bbox="821 951 1331 1283">                     Voltaje de Suministro 3.3~5.5V                      salida en voltaje 0~3V                      Precisión de medición <math>\pm 0.1 @ 25^\circ\text{C}</math>                      Rango de detección 0~14                      Rango de temperatura 5~60°C                      Punto Zero: <math>7 \pm 0.5</math>                      Tiempo de respuesta &lt;2min                      Vida útil de la sonda: &gt;0.5 Años                      (dependiendo de la frecuencia de uso).                      Longitud del cable: 100cm                 </p>
Conductividad	 <p data-bbox="418 1635 797 1755">Figura 9. Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor /Meter V2 (K=1) Fuente; (DFRobot, 2023)</p>	<p data-bbox="821 1346 1331 1640">                     Voltaje de Operación: 3.0 ~ 5VDC.                      Voltaje de salida 0~3.4V                      Rango de medición: 0~20ms/cm                      Rango de detección recomendado 1~15ms/cm                      Temperatura de operación: 0 a 40°C                      Precisión: <math>\pm 5\%</math> F.S                      Longitud del cable del Electrodo: 100cm aprox.                 </p>

Parámetro	Sensor	Características
Temperatura	 <p>Figura 10. Gravity: Waterproof DS18B20 Temperature Sensor Kit Fuente: (DFRobot, 2023)</p>	Usable con 3.0V a 5.5V Precisión de +/- 0.5°C en un rango de -10°C a +85°C Interfase de 3 hilos (VCC, GND, Data) Cuerpo del sensor en acero inoxidable de 6mm de diámetro por 35mm de largo Longitud del cable 90cm.

Fuente: Autora. Adaptado de (DFRobot, 2023).

Es importante aclarar que se busca comparar la información del sensor de bajo costo con un equipo disponible en el laboratorio de la universidad con el fin de evaluar el desempeño de ambos equipos de manera paralela. En la Tabla 4, se relaciona el equipo multiparamétrico de laboratorio utilizado.

Tabla 4. Multiparámetro utilizado en las pruebas de laboratorio

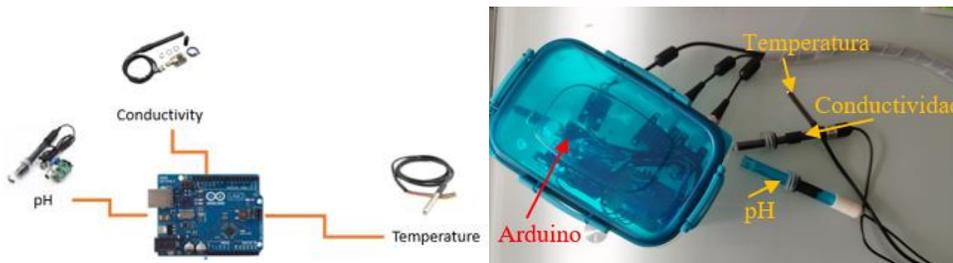
 <p>Figura 11. Hanna HI 9829</p>	<p><b>SENSOR DE pH</b>                      Rango de pH: 0.00 a 14.00 pH                      Resolución de pH: 0.01 pH                      Precisión de pH: ±0.02 pH</p> <p><b>SENSOR DE CONDUCTIVIDAD</b>                      Rango CE: 0 a 200 mS/cm (CE absoluta hasta 400 mS/cm)                      Resolución CE manual: 0,001 mS/cm.                      Exactitud CE: ± 1% de lectura o ± 1 µS/cm, lo que sea mayor.</p> <p><b>SENSOR DE TEMPERATURA</b>                      Rango de Temperatura: -5.00 a 55.00 °C, 23.00 a 131.00 °F, 268.15 a 328.15 K                      Resolución de Temperatura: 0.01 °C                      Precisión de Temperatura: ±0.15 °C</p>
---	---

Fuente: Autora. Adaptado de: (Hanna, 2023)

### 3.1.2 Configuración del sensor y el multiparámetro

Luego de seleccionados los sensores se realiza la conexión y la programación de cada uno de ellos usando el sistema embebido Arduino Uno. La Figura 12 (a) muestra la conexión realizada con el sensor de bajo costo. Cada uno de los sensores cuenta con un

módulo que convierte la señal análoga del sensor en valores que puedan ser interpretados por el sensor y estos se conectan al sistema embebido Arduino Uno. La Figura 12 (b) muestra el prototipo configurado y con el cual se realizaron las mediciones.



(a) Conexión de los sensores al Arduino (b) Equipo configurado  
Figura 12. Conexión de los sensores al sistema embebido

Fuente: Autora

En este caso se utilizan los códigos de programación sugeridos por el fabricante (i.e DFROBOT) y que se encuentran disponibles de manera online. A continuación, se comparten los enlaces correspondientes de donde se sacaron los códigos para programar acá uno de los sensores en el Arduino Uno y algunos tutoriales respecto a su funcionamiento:

- pH: <https://www.dfrobot.com/product-1782.html>
- Conductividad: <https://www.dfrobot.com/product-1123.html>
- Temperatura: <https://www.dfrobot.com/product-1354.html>

Estos códigos de programación son adaptados y modificados para que tomen datos cada segundo para que su funcionamiento sea lo más parecido a como se usa un multiparámetro. El código adaptado se encuentra en el **Anexo A: Código de programación para muestreo puntual Smart Sensor.**

### 3.1.3 Calibración del equipo Smart sensor (SS) y del multiparámetro (MP)

- **Calibración del equipo Smart Sensor (SS)**

El código propuesto por el fabricante y con el cual se programó el equipo cuenta con la configuración para calibrar los sensores. Esta calibración se realiza por medio de comandos que solicitan la solución buffer en cada caso (i.e. pH o conductividad), reconoce automáticamente la solución en la cual se sumergen los sensores y realiza la calibración (ver Tabla 5).

Tabla 5. Comandos de calibración sensores

<b>Calibración del PH</b>	
enterph	Entrar a modo de calibración de pH
calph	Calibrar con las soluciones <i>buffer</i> estándar, dos soluciones buffer (4.0 y 7.0) serán reconocidas automáticamente
exitph	Guardar los parámetros calibrados de pH y salir del modo de calibración
<b>Calibración de la conductividad eléctrica</b>	
enterec	Entrar a modo de calibración de conductividad eléctrica
calec	Calibrar con la solución buffer estándar 1413us/cm que será reconocida automáticamente
exitec	Guardar los parámetros calibrados de electro conductividad y salir del modo de calibración

Fuente: Autora. Tomado de: (DFRobot, 2023)

Para el caso de temperatura se realiza una verificación 1 a 1 con un sensor tipo punzón del laboratorio. Debido a que se detectó un desfase en el valor de la temperatura de 0.5° C se realizó la corrección correspondiente en el código del Arduino Uno.

La calibración para el *Smart Sensor* se realiza utilizando soluciones estándar *buffer* disponibles en laboratorio para los parámetros de pH y conductividad eléctrica. En el caso de pH la calibración se puede realizar a dos puntos con las soluciones *buffer* de pH 4 y 7. La conductividad se realiza con solución *buffer* 1413 uS/cm y para temperatura no se cuenta con soluciones *buffer*. En este último caso, la temperatura se puede calibrar por medición directa con un equipo calibrado y realizar las correcciones necesarias en el código de programa. La Figura 13 muestra el paso a paso realizado para la calibración del Smart Sensor.

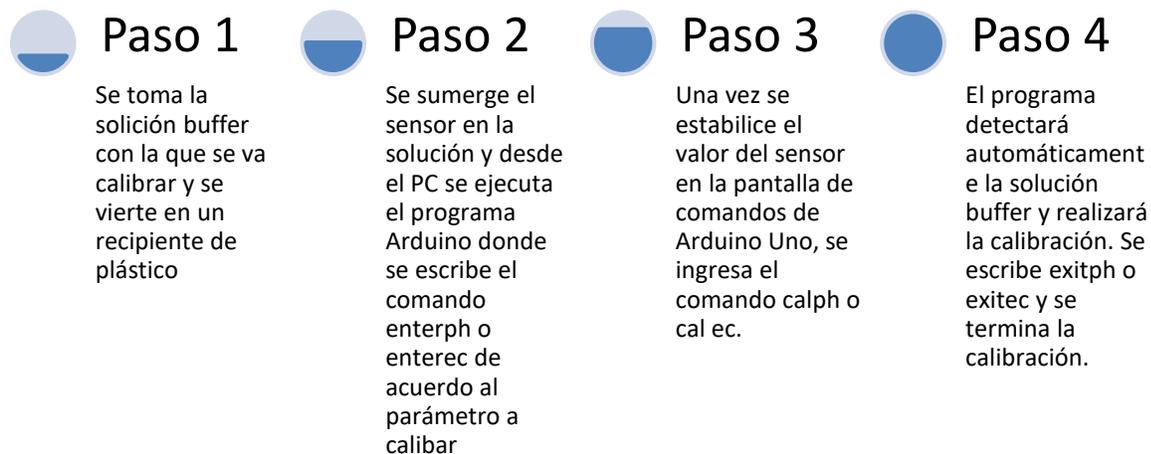


Figura 13. Paso a paso para la calibración del equipo Smart sensor.

Fuente: Autora.

- **Calibración del multiparámetro (MP)**

Debido a que se pretenden realizar una comparación de la información capturada con un MP, este equipo también debe ser calibrado. Se utiliza el procedimiento interno con el que cuenta el multiparámetro Hanna HI 9829.

La calibración para el multiparámetro se realiza utilizando soluciones *buffer* disponibles en el laboratorio para pH y conductividad eléctrica. En el caso de pH la calibración se realiza a tres puntos con las soluciones buffer de pH 4, 7 y 10. La conductividad se puede realizar con las soluciones buffer (84  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 5.00 mS/cm, 12.88 mS/cm, 80.0 mS/cm, 111.8 mS/cm) o un punto personalizado en este caso se calibro con la solución 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Para temperatura no se cuenta con buffer. En este último caso, la temperatura se puede calibrar por medición directa con un termómetro tipo punzón, al igual que el equipo SS.

### 3.2 Evaluación del desempeño del SS frente al MP

Las pruebas en laboratorio bajo condiciones controladas fueron realizadas en dos escenarios. El primer escenario fue luego de configurar en equipo SS y el segundo escenario bajo condiciones reales de campo con un muestreo de escorrentía superficial. En el segundo escenario surgieron unas fallas en el equipo que llevaron a mejorar la configuración del equipo en software y hardware por medio de filtros de ruido, mejoras en

el cableado y correcciones en los valores de temperatura. Luego de estas mejoras se llevó nuevamente el equipo a laboratorio con el fin de evaluar dichas mejoras. A continuación, se detallan los resultados de este primer objetivo para cada uno de los escenarios.

### 3.2.1 Escenario 1: Pruebas en laboratorio

Luego de seleccionar los sensores, el sistema embebido, realizar la programación y calibración de los sensores correspondiente, se llevó el equipo *Smart Sensor* al laboratorio bajo condiciones controladas. Se realizan medidas por triplicado, tomando datos con el SS y el MP cada 2 min durante 20 minutos. El **Anexo B: Datos tomados en laboratorio** (Datos escenario 1) muestra los datos obtenidos por triplicado de ambos equipos en laboratorio y los que son usados en el presente análisis. Es importante aclarar que estos datos se toman de la manera más similar posible en los mismos *beakers* y de manera simultánea para obtener las condiciones más equitativas en ambos equipos.

- **Análisis de los resultados con respecto a las soluciones buffer**

De manera inicial se busca determinar si los datos capturados con los dos equipos tienen un comportamiento normal con el fin de realizar una prueba paramétrica o no paramétrica que permita comparar los resultados obtenidos por ambos equipos.

Para realizar las comparaciones entre ambos equipos para pH y EC, se calculan los porcentajes diferencia entre el valor esperado que corresponde al valor de las soluciones buffer en cada caso y el valor tomado por cada equipo por medio de la Ecuación 5. En el caso del pH se unen los valores de las diferencias para pH 4 y 7 con el fin de unificar el análisis de este parámetro. Es importante aclarar que a pesar de que existe la solución buffer de pH 10, esta no se tuvo en cuenta en los análisis debido a que el SS no fue calibrado con esta solución. La aplicación del porcentaje de diferencia tiene como objetivo estandarizar los datos adquiridos mediante los sensores en comparación con las soluciones buffer, especialmente en el caso del pH, donde se emplean dos soluciones buffer (pH 4 y pH 7). En cuanto a la temperatura, la comparación se lleva a cabo de forma directa entre ambos equipos, ya que no se contaba con una solución buffer para este parámetro.

$$\% \text{ diferencia} = \left( \frac{VEq - Sol.B}{Sol.B} \right) \text{ Ecuación 5.}$$

En donde,

*VEq* = dato leído por el equipo

*Sol. B* = solución buffer utilizada para cada caso

Se realiza la prueba de Shapiro-Wilk para cada uno de los parámetros analizados (i.e. pH, conductividad y temperatura) en donde se toma como hipótesis nula que el grupo de datos pertenece a una distribución normal. Si el p-valor es menor a alfa entonces la hipótesis nula es rechazada. Se observa una distribución no normal para los porcentajes de diferencia de los parámetros medidos por el equipo SS y el MP (ver Tabla 6) y lo que se confirma con la prueba de Shapiro-Wilk con un p-value menor que 0.05. El p-value hace referencia al valor de la probabilidad y W-stat es la función con la cual se ejecuta el test de Shapiro-Wilk en Excel. Para poder comparar ambos equipos mediante una prueba Anova se requiere que todos los grupos de datos a comparar (SS vs MP) tengan una distribución normal. Por lo tanto, se considera una prueba no paramétrica para este análisis como la Kruskal-Wallis para comparar los datos de los dos equipos.

Tabla 6. Prueba de Shapiro-Wilk para los porcentajes de diferencia de los parámetros.

	<i>SS pH</i>	<i>MP pH</i>	<i>SS EC</i>	<i>MP EC</i>	<i>SS Temp</i>	<i>MP Temp</i>
W-stat	0.93190002	0.86480267	0.96333757	0.92394935	0.96403575	0.33870564
p-value	5.0445E-06	1.2653E-09	0.04838853	0.00059333	0.00145272	0
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
normal	no	no	no	no	no	no

Fuente: Autora

La distribución no normal encontrada para los sensores analizados concuerda con los resultados del estudio realizado por Castro (2012), en el cual se evaluó equipos de pH y conductividad y en donde también se observó un comportamiento no normal de los datos al tomar las medidas del equipo con soluciones buffer. Este estudio incluso considero la prueba de Kruskal-Wallis para comparar la medida del equipo con los valores esperados de las soluciones buffer. Entonces, se aplica la prueba de Kruskal-Wallis para determinar si existen discrepancias significativas entre los porcentajes de diferencias de pH y EC (% diff pH, % diff EC) y las diferencias de temperatura (diff Temp) del MP y del SS.

Posteriormente, se compara la distribución obtenida de los porcentajes de diferencia con ambos equipos por medio de *box-plots* y de manera cuantitativa con un análisis estadístico descriptivo simple.

Los resultados del análisis de Kruskal-Wallis (ver Tabla 7) muestran que para el sensor de pH y de temperatura no hay diferencias estadísticamente significativas entre las diferencias de los datos tomados con el SS y el MP y las soluciones buffer. Sin embargo, para el caso de la EC se muestra que si hay diferencias estadísticamente significativas. A pesar de que esta prueba no nos muestra si esas diferencias significativas son positivas o negativas este análisis nos permite observar si los datos tomados en el laboratorio con los equipos frente a las soluciones buffer son similares.

Tabla 7. Análisis de Kruskal-Wallis de los parámetros con el SS y el MP.

	% diff pH	% diff EC	Diff Temp
<i>p-value</i>	0.73085532	6.7143E-20	0.42470677
<i>alpha</i>	0.05	0.05	0.05
Diferencia significativa	no	si	no

Fuente: Autora

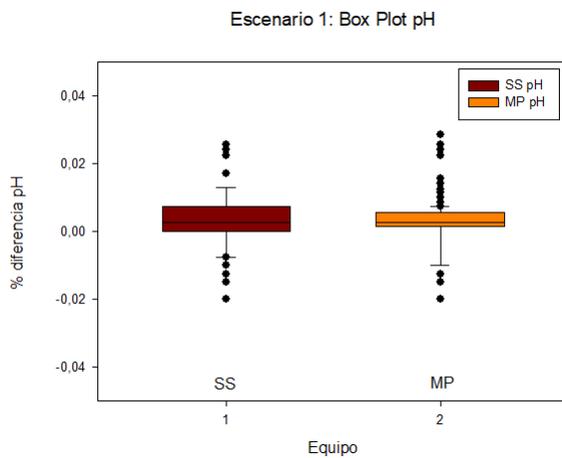


Figura 14. Boxplot para el SS y el MP de los % de diferencia con la variable de pH

Fuente: Autora

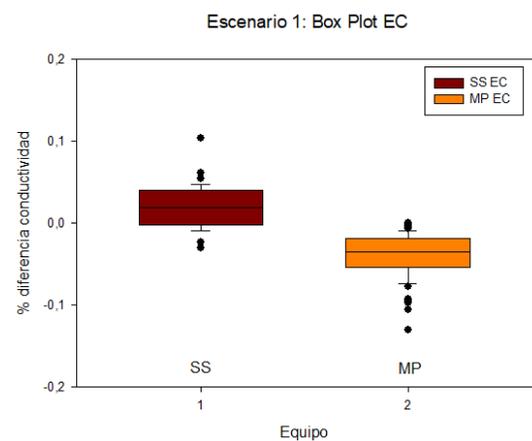


Figura 15. Boxplot para el SS y el MP de los % de diferencia con la variable de EC

Fuente: Autora

La Figura 14 y la Figura 15 muestran los *boxplot* generados para los porcentajes de diferencias de pH y conductividad con respecto a las soluciones estándar buffer. Para el

pH se observa que las medianas entre el SS y el MP son iguales y cercanas al valor 0. Esto indicaría que ambos equipos están tomando medidas muy similares y cercanas al valor esperado de la solución *buffer*. Se puede ver que tanto para el SS como para el MP los equipos tienden a sobre estimar la medida de pH. Igualmente, se puede observar en los *boxplots* que el SS presenta mayor dispersión que el MP, pero el MP muestra más valores externos alejados al valor esperado (la mediana).

Con respecto a los datos de EC se observa que la mediana del SS está más cerca al porcentaje de diferencia cero en comparación a la mediana del MP y con una menor dispersión de los datos. Para estos datos se puede ver que el SS tiende a sobreestimar ligeramente la medida de EC, mientras que el MP la subestima significativamente. Esto se corrobora con los cálculos de las medias y medianas mostradas en la Tabla 8.

Igualmente, de la información de la Tabla 8 podemos observar que para el caso de la variable de pH la dispersión de los datos entre el SS y el MP es la misma de acuerdo con la desviación estándar y la variancia. Para el caso del EC, el equipo MP muestra una mayor dispersión comparada al del SS como se observa en la Figura 15. Es importante destacar de la tabla 7 que el número de datos mostrados corresponden a 132 datos para pH que fueron los datos tomados con la solución buffer de pH 4 y pH 7. Para el caso de EC son los 66 datos recopilados con la solución buffer 1413uS/cm. Finalmente, para el caso de temperatura son 198 datos que son la suma de las temperaturas tomadas cuando se registraron todos los datos de pH y EC.

Tabla 8. Análisis estadístico de los datos tomados para pH, EC y Temp con el SS y el MP

	<i>SS pH</i>	<i>MP pH</i>	<i>SS EC</i>	<i>MP EC</i>	<i>SS Temp</i>	<i>MP Temp</i>
Media	0.003	0.003	0.020	-0.039	21.963	21.942
Mediana	0.003	0.003	0.019	-0.035	21.810	21.830
Desviación estándar	0.008	0.008	0.025	0.027	0.682	1.538
Variancia de muestra	0.000	0.000	0.001	0.001	0.465	2.366
Máximo	0.026	0.029	0.104	0.001	23.620	24.110
Mínimo	-0.020	-0.020	-0.030	-0.130	20.560	2.980
Conteo	132	132	66	66	198	198

Fuente: Autora

En el caso de la temperatura debido a que no se contaba con soluciones *buffer* se realiza un análisis de la dispersión de los datos tomados en el laboratorio en donde se observa

que no hay diferencias significativas entre los valores tomados por ambos equipos. Sin embargo, el MP muestra la presencia de más valores atípicos. Estos valores atípicos no significan que sean errores en el equipo debido a que la temperatura varía a lo largo de las pruebas en laboratorio, pero si muestran una mayor dispersión de los datos por parte del MP en comparación del SS. La Tabla 8 muestra que las medianas de los equipos son prácticamente iguales con una diferencia de  $0.02^{\circ}\text{C}$ , la dispersión de los datos es igual y las diferencias se observan en los valores mínimos, mínimos y la cantidad de valores atípicos (ver Figura 16) donde se puede apreciar que el MP presenta una mayor dispersión de los datos.

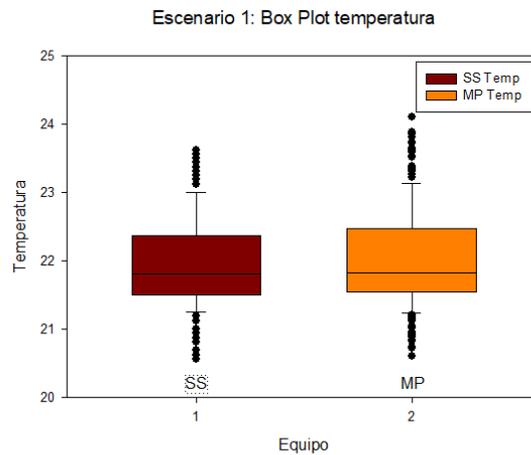


Figura 16. *Boxplot* para el SS y el MP de la variable de temperatura

Fuente: Autora

### 3.2.2 Escenario 2: Pruebas en campo con cuerpos de agua superficiales y en laboratorio con mejoras en el SS

- **Pruebas en campo y mejoras en el SS**

Debido a que se busca que el equipo SS se utilice para medir escorrentía superficial se llevó el equipo a campo con el fin de evaluar su desempeño frente a condiciones reales en el campus Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. El mapa de la Figura 17 muestra los cuatro puntos en los cuales se puso a prueba el equipo.



Figura 17. Mapa puntos de agua superficial del campus

Fuente: Autora

Se realizaron dos campañas de muestreo el 10 y el 14 de marzo de 2023, cuyos resultados son los mostrados de las Figura 18 a la Figura 20. Se observa una diferencia significativa entre los datos tomados con el equipo SS y el MP, siendo los datos de conductividad los que mayores diferencias presentan debido a que el sensor de bajo costo mostró errores en la medida con valores de hasta  $900 \mu\text{S}/\text{cm}$  cuando el valor tomado por el multiparámetro es de  $80 \mu\text{S}/\text{cm}$ . En el caso de la temperatura se observa que los valores tomados con el SS y el MP presentan tendencias y dispersiones muy similares con medianas muy cercanas entre el SS y el MP. De igual manera al observar los cuerpos de agua con mayores diferencias entre el SS y el MP (M1 y M2 en Figura 17), se identifica que estos cuerpos de agua son alimentados con agua lluvia y con agua potable para mantener el espejo de agua constante y se especula que esto afecta la medida que es tomada por el SS. Durante las pruebas de campo con el Sensor de Temperatura, se notó una sensibilidad en el cableado, afectando las mediciones según la ubicación del sensor. Esto se debió al uso de cables Jumper de Arduino en el prototipo, los cuales son fáciles de desconectar debido a que el uso de este tipo de cables es educativo y no quedan soldados los cables al Arduino Uno. Los resultados indican que el equipo SS es más susceptible a variaciones en los parámetros que el multiparámetro (MP).

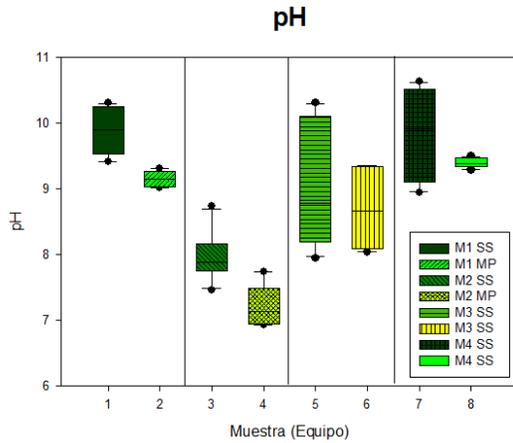


Figura 18. Valores de pH de los puntos muestreados

Fuente: Autora

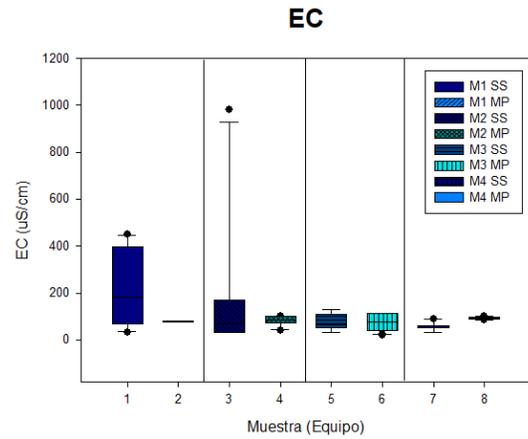


Figura 19. Valores de EC de los puntos muestreados.

Fuente: Autora

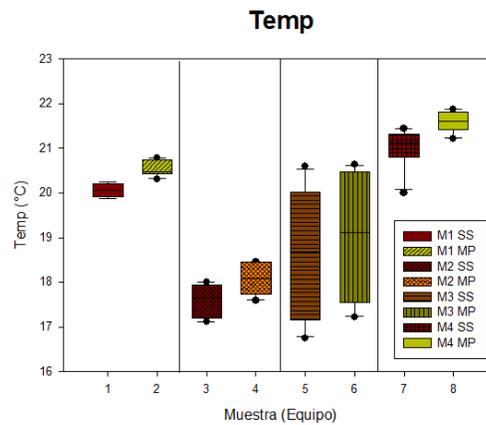


Figura 20. Valores de Temperatura de los puntos muestreados.

Fuente: Autora

Debido a que se observa unas diferencias significativas entre ambos equipos se procede a llevar el equipo SS nuevamente a laboratorio con el fin de mejorar la configuración del equipo en cuanto a software y hardware. Los cambios realizados a la versión final del equipo SS fueron:

- Hardware: mejoras en el cableado, se soldaron varios componentes para evitar que se movieran de su lugar y se usan filtros de ruido en las sondas de los sensores.
- Software: corrección en la temperatura que se realiza en el código del programa. Se realiza un ajuste de +0.5°C. Los cuales fueron calculados al comparar los datos

del SS con un termómetro tipo punzón en el laboratorio que estaba calibrado y validado por el laboratorio de ingeniería ambiental de la universidad.

- **Datos después de las mejoras en el SS**

Se realiza la prueba de Shapiro-Wilk para cada uno de los parámetros analizados (i.e. pH, conductividad y temperatura) después de las mejoras, en donde se observa un comportamiento de no normalidad de los datos tomados con el equipo exceptuando para el caso del sensor del EC del SS (ver Tabla 9). Nuevamente trabajamos con los porcentajes de diferencias de cada parámetro. Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos con la prueba de normalidad donde el comportamiento de los datos en la mayoría de los casos es no normal, se realiza una prueba no paramétrica para todas las variables como la Kruskal-Wallis. Los datos de estos análisis son mostrados en el **Anexo B: Datos tomados en laboratorio (Datos escenario 2)**.

Tabla 9. Prueba de Shapiro-Wilk después de las mejoras

	<i>SS pH</i>	<i>MP pH</i>	<i>SS EC</i>	<i>MP EC</i>	<i>SS Temp</i>	<i>MP Temp</i>
W-stat	0.85142	0.85972	0.94706	0.90714	0.92261	0.92660
p-value	1.3423E-06	2.4497E-06	0.10916056	0.00820332	0.00051938	0.00077481
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
normal	no	no	yes	no	no	no

Fuente: Autora

Los resultados de la Prueba de Kruskal-Wallis para este grupo de datos es similar al mostrado en el escenario 1 (ver Tabla 10), determinando que no existe diferencia para pH y temperatura, pero si existe diferencias significativas para EC entre las mediciones del MP y el SS.

Tabla 10. Análisis de Kruskal-Wallis del escenario 2 con el SS y el MP.

	pH	EC	Temp
p-value	0.05825826	1.4794E-08	0.09596409
alpha	0.05	0.05	0.05
Diferencia significativa	no	si	no

Fuente: Autora

• **Datos con mejoras del SS y el MP**

La prueba de Kruskal-Wallis, destaca que las mejoras realizadas en el equipo redujeron la dispersión del equipo de SS y por ende se mejoró la precisión del equipo. La Figura 21 y la Figura 22 muestran los *box-plot* generados para los porcentajes de diferencia de pH y EC después de las mejoras. Una manera de comprobar dicha información se realiza por medio del cálculo de métricas que permitan establecer la precisión y la exactitud del equipo antes y después de las mejoras (ver numeral 3.2.3).

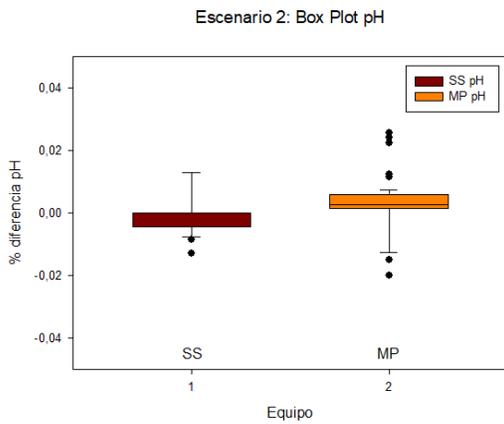


Figura 21. Boxplot para el SS mejorado y el MP con la variable de pH

Fuente: Autora

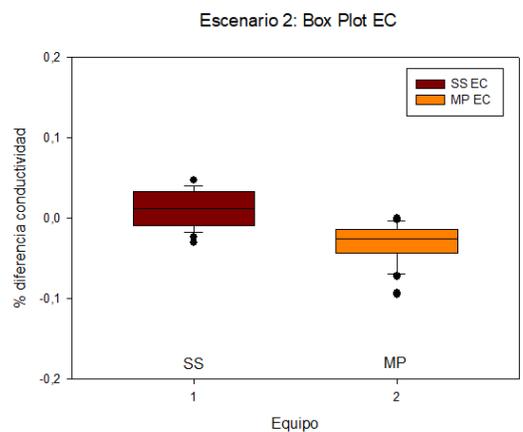


Figura 22. Boxplot para el SS mejorado y el MP con la variable de EC

Fuente: Autora

En este caso tanto para el sensor de pH como el de temperatura se redujeron la cantidad de valores atípicos, la varianza y desviación estándar de los datos obtenidos con el SS en comparación a la prueba del escenario 1. Para este escenario (después de las mejoras), se observa que las medianas entre ambos equipos son cercanas a cero donde el MP tiende a sobrestimar ligeramente la medida de pH y subestimar la medida de EC. Nuevamente vemos que el SS muestra mejores resultados para estimar la medida de EC con diferencias cercanas a 0 con respecto a la solución *buffer*. Por lo tanto, podemos inferir que los cambios de *hardware* y *software* realizados en el equipo generaron mejoras en los datos tomados con el SS y que se debe tener cuidado con el cableado del equipo y mantener los filtros de ruido para generar una salida más estable de los datos tomados por los sensores de bajo costo.

Tabla 11. Análisis estadístico de los datos tomados para el SS mejorado y el MP

	<i>SS pH</i>	<i>MP pH</i>	<i>SS EC</i>	<i>MP EC</i>	<i>SS Temp</i>	<i>MP Temp</i>
Media	0.000	0.002	0.010	-0.032	22.084	22.168
Mediana	0.000	0.003	0.012	-0.025	22.095	22.110
Desviación estándar	0.007	0.008	0.022	0.025	0.678	0.576
Variación de muestra	0.000	0.000	0.000	0.001	0.460	0.331
Máximo	0.013	0.026	0.047	0.001	23.370	23.270
Mínimo	-0.013	-0.020	-0.030	-0.096	20.940	21.250
Conteo	66.000	66.000	33.000	33.000	66.000	66.000

Fuente: Autora

En el caso de la temperatura, se observa que no hay diferencias significativas entre los valores tomados por ambos equipos. En este caso se observa que a comparación del escenario 1 las cajas de los *box-plot* muestran una mayor dispersión, pero una reducción de los valores atípicos de ambos equipos. Sin embargo, nuevamente es el SS el que muestra menores dispersiones en comparación al MP (ver Tabla 11 y Figura 23).

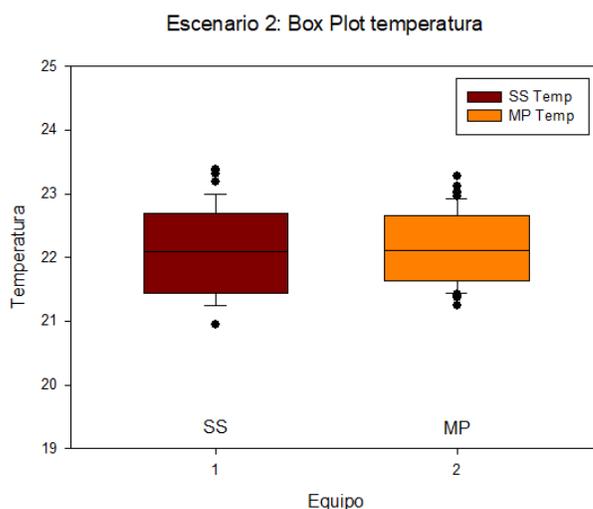


Figura 23. *Box-plot* para el SS y el MP con la variable de temperatura

Fuente: Autora

### 3.2.3 Evaluación de la precisión y la exactitud de los resultados

Para esta evaluación de la precisión y la exactitud, se toman los datos obtenidos en el escenario 1 y el escenario 2 en el laboratorio para pH y EC que son los que tienen un punto de comparación o de valores de referencia en las soluciones buffer. Las ecuaciones utilizadas para estos cálculos son las descritas en el marco de referencia donde la precisión

se puede calcular por medio de las métricas de RMSE, RAE y MAE y la exactitud por medio de la desviación estándar. Es importante recordar que para todas las métricas un buen valor o lo que expresa una buena precisión y exactitud es cuando está cercano a 0. La Tabla 12 muestra los resultados de este análisis en donde se observan mejoras en las métricas de precisión y exactitud del equipo SS con mejoras. Para el caso de pH se observan comportamientos muy similares entre lo que mide el SS mejorado y el MP frente a precisión y exactitud y se puede inferir que se puede utilizar el SS mejorado con la misma confiabilidad con que se utiliza un MP en laboratorio para mediciones puntuales. Por otro lado, en el caso de EC se observa que el SS mejorado tiene una mejor precisión frente al MP. Sin embargo, la exactitud de ambos equipos es muy similar con diferencias de 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aproximadamente en ambos escenarios. Al comparar estos resultados con lo que indica el fabricante de los sensores (ver Tabla 3) de bajo costo, vemos que el equipo está cumpliendo con lo que promete bajo condiciones de laboratorio (precisión de 0.1 de pH y 5% para la EC). Se concluye entonces, que el SS tiene al menos la misma precisión y exactitud que el MP para el parámetro de pH y una mejor exactitud y precisión para el caso de la EC.

Tabla 12. Métricas para calcular la precisión y exactitud del equipo.

Métrica	Escenario 1				Escenario 2			
	pH		EC		pH		EC	
	SS	MP	SS	MP	SS	MP	SS	MP
<b>RMSE</b>	0.046	0.041	54.333	74.701	0.045	0.046	33.092	57.130
<b>RAE</b>	0.001	0.001	0.015	0.023	0.007	0.008	0.009	0.016
<b>MAE</b>	0.019	0.030	22.200	32.000	0.021	0.034	13.410	22.576
<b>DESVT</b>	1.53	1.53	35.189	39.191	1.52	1.53	30.464	35.701

Fuente: Autora

### 3.2.4 Incertidumbre de los datos después de las mejoras

Finalmente, y teniendo en cuenta que la precisión y la exactitud del equipo no fue perfecta se realiza un análisis de incertidumbre de los datos para tener esto en cuenta en los análisis posteriores que se toman con estos equipos (ver Tabla 13 y Tabla 14). Se realiza el cálculo de la incertidumbre utilizando el método Tipo A, el cual es la desviación típica experimental de las medidas que se derivan de análisis del promedio de los datos y la desviación estándar de los mismos. El procedimiento consiste en calcular el valor promedio de los

datos obtenidos para cada parámetro, luego la desviación estándar de los datos y finalmente la incertidumbre estándar dividiendo la desviación estándar en la raíz cuadrada del número de datos analizados. Es importante aclarar que estas incertidumbres son calculadas con los datos obtenidos en el laboratorio del escenario 2 con el SS mejorado. Los resultados muestran que la incertidumbre de los datos del MP es mayor a los del SS mejorado, siendo la conductividad el valor con mayor interferencia para ambos casos. Sin embargo, al analizar especialmente la información del SS se puede ver que este está cumpliendo con lo que es prometido por el proveedor en el equipo.

Tabla 13. Incertidumbre de los datos del SS

	pH 4	pH 7	EC	Temp
Promedio	4.00	7.01	1426.97	21.96
Desviación estándar	0.02	0.06	30.46	0.68
Conteo	33.00	33.00	33.00	198.00
Incertidumbre exacta	0.00	0.01	5.30	0.05
Valor de los datos y su incertidumbre	4 ± 0.00	7 ± 0.01	1426 ± 5.3	21.96 ± 0.05

Fuente: Autora

Tabla 14. Incertidumbre de los datos del MP

	pH 4	pH 7	EC (uS/cm)	Temp (°C)
Promedio	4.00	7.03	1367.97	21.94
Desviación estándar	0.04	0.04	35.70	1.54
Conteo	33.00	33.00	33.00	198.00
Incertidumbre exacta	0.01	0.01	6.21	0.11
Valor de los datos y su incertidumbre	4 ± 0.01	7 ± 0.01	1368 ± 6.21	21.94 ± 0.11

Fuente: Autora

## 4. Capítulo 4: Evaluación del desempeño del sistema de monitoreo en condiciones reales de campo

Ahora que se cuenta con un equipo configurado y calibrado a bajo costo se busca evaluar su desempeño en condiciones de campo, realizando una comparación directa en campo con un MP. Para lograr este objetivo se realizaron campañas de monitoreo durante varios días con el fin de evaluar si la configuración realizada del SS mejorado (de aquí en adelante SS) en laboratorio podía capturar información confiable en comparación al MP. En este caso y a diferencia del capítulo 3, se toma como punto de referencia los datos tomados por el multiparámetro y no una solución buffer, asumiendo que el MP es la mejor información que se tendría en campo. En este caso se realiza una comparación de la dispersión de los datos obtenidos por ambos equipos con el fin de determinar si hay diferencias entre ambas medidas. La Figura 24 muestra el resumen gráfico del presente capítulo.

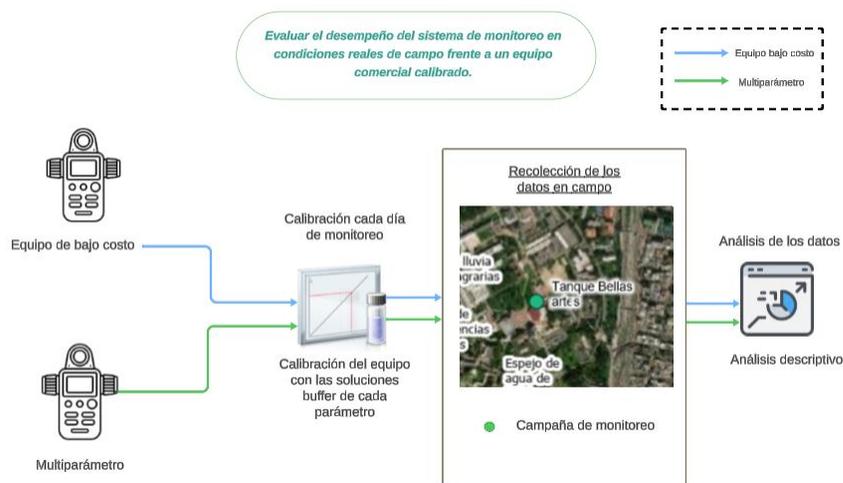


Figura 24. Resumen gráfico del capítulo 4

Fuente: Autora

## 4.1 Punto para pruebas del monitoreo puntual

La Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá cuenta con varios tanques de agua lluvia que recolectan agua de los edificios del campus (ver Figura 25). Estos tanques, los cuales son considerados SUDS por la norma NS-166 (SDA, 2020), fueron visitados en compañía de la Oficina de Gestión Ambiental (OGA) de la universidad. Debido a que uno de los principales objetivos del equipo SS es que pueda monitorear agua lluvia en un SUDS, los tanques son un punto de interés para las pruebas con el equipo SS.

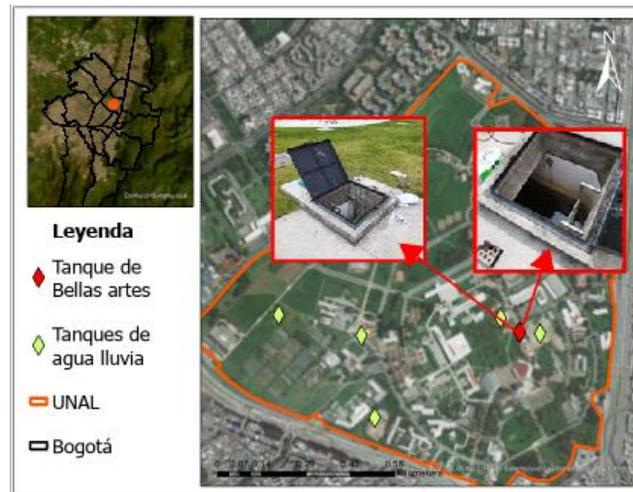


Figura 25. Tanques de agua lluvia del campus de la UNAL

Fuente: Autora

El permiso de acceso se obtiene por parte de la OGA de la Universidad Nacional- Sede Bogotá, después de las visitas. Se selecciona el tanque de agua lluvia del edificio de bellas artes teniendo en cuenta la facilidad para acceder al tanque, profundidad del tanque, facilidad para ubicar los sensores en el tanque sin que los estudiantes corran riesgos. La Figura 26 muestra fotografías del punto seleccionado para el monitoreo puntual con el SS.



Figura 26. Tanque de agua lluvia de bellas artes.

Fuente: Autora

## 4.2 Datos recopilados en campo

Luego de seleccionado el tanque de agua lluvia de bellas artes para el monitoreo se realizan campañas de monitoreo durante el mes de junio y julio del 2023 utilizando el equipo SS configurado luego de las mejoras mostradas en el capítulo 3. La Figura 27 muestra los dos cables de los equipos descendiendo al interior del tanque para capturar datos durante esta campaña de monitoreo.



Figura 27. Toma de datos en campo

Fuente: Autora

Durante los monitoreos se realizaron mediciones puntuales cada 2 minutos con el SS y el MP de manera paralela en cada campaña (ver **Anexo C: Datos tomados en la campaña de monitoreo en campo con el SS y el MP**). Es importante aclarar que cada vez que se llevaban ambos equipos a campo se realizaba la respectiva calibración bajo las mismas condiciones y con los mismos estándares en el laboratorio. Durante las diferentes campañas de monitoreo se notaron algunos errores en las medidas del equipo SS nuevamente por movimiento de los cables durante la toma de datos. Esta sensibilidad que se trató de corregir anteriormente nuevamente ocurrió en campo. Sin embargo, no ocurrió en todos los monitoreos, era fácil detectar la falla y en este caso no se obtenían datos ilógicos como si ocurrió con el equipo la primera vez que fue llevado a campo (ver capítulo 3) por lo tanto se pudo trabajar con la información obtenida de los monitoreos. Los resultados de esta tesis muestran que se debe evitar el uso de los cables que se usan en prototipos Arduino y lo ideal es generar placas que tengan soldados todos los componentes para evitar errores por hardware. Al final del presente trabajo se logró configurar en un prototipo que puede cumplir con estas mejoras (ver subcapítulo 4.5)

### 4.3 Datos recompilados en campo para el monitoreo puntual

Teniendo en cuenta los errores presentados en el equipo se decidió trabajar únicamente con los monitoreos que tuvieran una diferencia entre lo tomado por el MP y el SS no mayor a 1 unidad de pH, 100 uS/cm para EC y 0.5°C para Temp de manera conjunta para cada evento. La Figura 28 muestra las diferencias entre el MP y el SS para cada uno de los eventos monitoreados diferenciados en los parámetros analizados. Las líneas rojas indican las diferencias máximas que se iba a permitir en cada parámetro. Estos valores de error se determinaron por ensayo y error teniendo en cuenta el error máximo que se permitiría por parte del equipo de bajo costo. Es importante aclarar que al tomar el equipo MP como referencia, se está considerando que este equipo puede tener algún porcentaje de error en las mediciones (tal como se analizó en el capítulo 3) y por lo tanto en este análisis se podría ser más flexibles en las medidas esperadas por el SS.

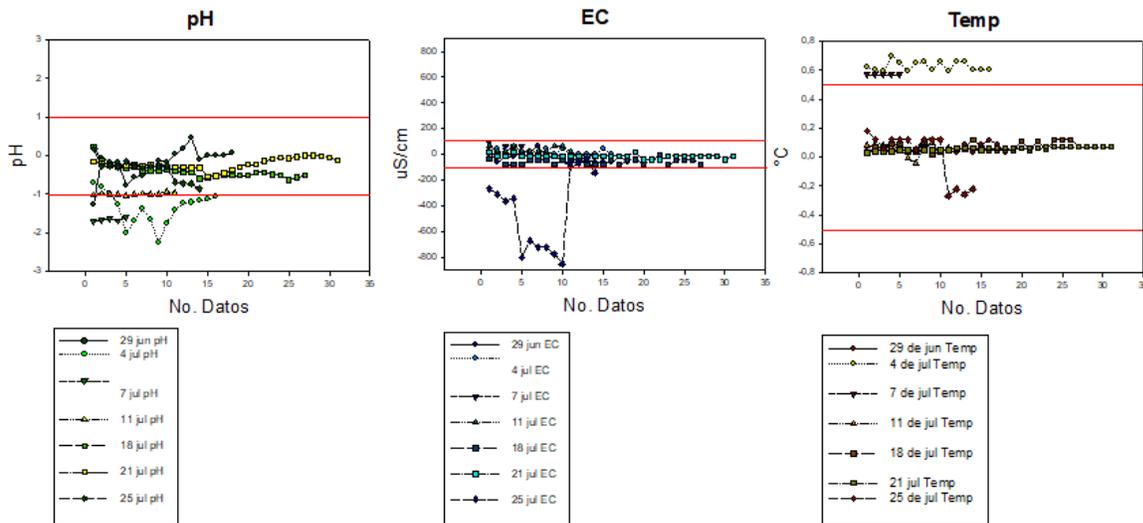


Figura 28. Diferencias entre el MP y el SS para cada evento monitoreado.

Fuente: Autora

De las gráficas se puede observar diferencias significativas entre los equipos para las fechas diferentes al 29 de julio, 18 y 21 de julio. Por lo tanto, se utilizan estas 3 últimas fechas para analizar los datos. A continuación, se presenta el resumen de los datos en las fechas seleccionadas (ver Figura 29).

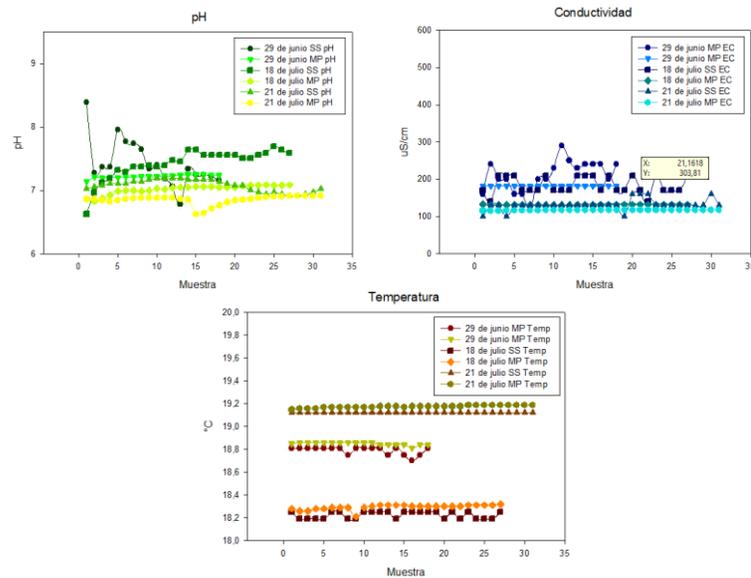


Figura 29. Eventos seleccionados

Fuente: Autora

A partir de esta información se realiza la evaluación de la distribución de los datos por cada parámetro y una comparación de la información de ambos equipos. Los resultados obtenidos por la prueba de Shapiro-Wilk de las diferencias entre el SS y el MP muestran que los datos obtenidos por ambos equipos tienen un comportamiento no normal con p-value menor que 0.05 (ver

Tabla 15). Por lo tanto, nuevamente para comparar los datos de ambos equipos se deberá realizar por medio de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 15. Test Shapiro-Wilk de la campaña de monitoreo

	<i>pH SS</i>	<i>pH MP</i>	<i>EC SS</i>	<i>EC MP</i>	<i>Temp SS</i>	<i>Temp MP</i>
W-stat	0.922671094	0.926969363	0.907107987	0.55518591	0.62689962	0.6113991
p-value	0.000282235	0.000444361	5.96561E-05	1.9507E-13	3.078E-12	1.646E-12
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
normal	no	no	no	no	no	no

Fuente: Autora

Al realizar el análisis de Kruskal-Wallis con los datos tomados en cada una de las fechas del monitoreo (29 de junio, 18 y 21 de julio) se observa que hay diferencias significativas entre el SS y el MP para estos datos tomados en campo para el caso de EC. Sin embargo, para el caso de pH y Temp se encontró que no hay diferencias significativas de los datos tomados en campo. Únicamente, para el caso de los datos de pH tomados el día 29 de

junio es que se observan diferencias significativas, que fue un día en el cual el SS generó mayores variabilidades de los datos tomados para este parámetro (ver Figura 29).

Tabla 16. Test de Kruskal-Wallis de las diferencias significativas entre SS y MP

	29 de junio			18 de julio			21 de julio		
	SS EC vs Mp EC	SS Temp vs Mp Temp	SS pH vs Mp pH	SS EC vs Mp EC	SS Temp vs Mp Temp	SS pH vs Mp pH	SS EC vs Mp EC	SS Temp vs Mp Temp	SS pH vs Mp pH
p-value	0.01148	0.2102	0.03423	0.05399	0.196	0.6601	0.01648	0.1805	0.67492
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Diferencia significativa	si	no	si	si	no	no	si	no	no

Fuente: Autora

### Diferencias entre los datos del SS y el MP

Debido a que la prueba de Kruskal-Wallis infiere que hay una diferencia estadística significativa entre los datos del MP y el SS, pero no indica si las diferencias son positivas o negativas o cual la magnitud de estas diferencias, a continuación, se realiza un análisis de los datos teniendo en cuenta la diferencia entre los datos tomados por el MP y el SS.

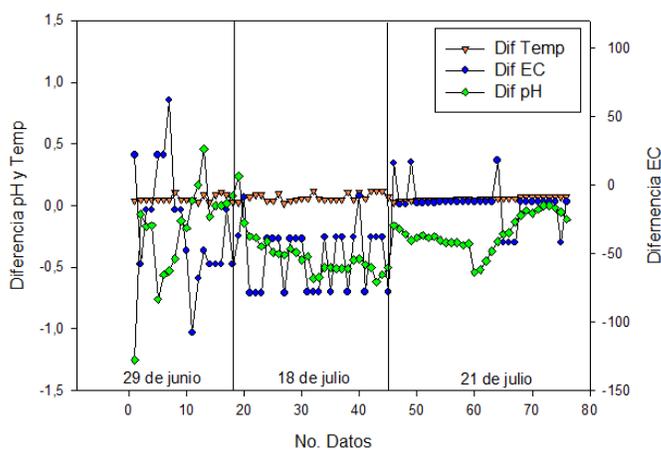


Figura 30. Diferencia entre los datos del MP y el SS

Fuente: Autora

La Figura 30 muestra las diferencias entre los datos del MP y el SS para las fechas seleccionadas (29 de junio muestra 0 a 27, 18 de julio muestra 28 a 45, 21 de julio muestra 46 a 76) para los parámetros de pH, EC y temperatura. Es evidente que los datos de

temperatura confirman una gran similitud entre las sondas SS y MP, como se muestra en la prueba de laboratorio del capítulo 3. El pH, la temperatura y la EC exhiben diferencias que van desde -1,25 a 0,4 unidades de pH, 0,01 a 0,13 °C y -108 a 62 μS/cm, respectivamente, siendo la fecha del 29 de junio la fecha en la cual mayores diferencias entre los datos del MP y el SS se presentaron. Como era de esperar, la temperatura es más estable en ambas sondas a diferencia del pH y la EC. Por el contrario, la alta variabilidad en el pH y la EC no impone grandes diferencias entre las dos sondas, lo que resulta en que el equipo SS podría considerarse confiable. Adicionalmente, si tenemos en cuenta los resultados obtenidos del laboratorio en donde se encontró que los resultados obtenidos por el MP se alejaban más del valor de las soluciones *buffer* que el SS. Se observó que el MP subestimaba la medida y el SS la sobrestimaba indicando que las medidas de ambos equipos se están alejando una del otro y lo que podría explicar porque acá se están encontrando las diferencias de la Figura 30. Por lo tanto, de este análisis no se puede concluir que el SS está haciendo un mal trabajo al compararlo con el MP, pero si se puede concluir que el SS está haciendo un buen trabajo en condiciones de laboratorio pero que al llevar el equipo a campo empiezan a mostrarse mayores interferencias y se debe buscar otra alternativa para validar si los datos tomados por el SS son confiables.

La Tabla 17 muestra tres métricas para evaluar la diferencia entre los valores tomados en campo por el MP y el SS donde los valores ideales son los cercamos a cero. Para esta prueba de campo, se encontró que la temperatura tiende a ser ligeramente sobreestimada por la sonda SS, pero el pH y la CE tienden a ser subestimados por el SS en comparación con los valores del equipo MP de acuerdo con el promedio de los porcentajes de diferencia. Los valores de RMSE y MAE indican que la EC es el parámetro que más diferencias presenta entre los equipos SS y MP, mientras que el pH y la Temp se encuentran muy cercanos.

Tabla 17. Métricas para comparar los valores del MP con el SS

Parámetro	Métrica		
	RMSE	MAE	% Diferencia Prom
	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MP - SS)^2}{n}}$	$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  MP - SS $	$\% Di = \frac{MP - SS}{MP} \times 100$
pH	0.44	0.39	-5.03%
EC	55.43	50.17	-33.88%
Temp	0.07	0.07	0.37%

Fuente: La autora

#### 4.4 Análisis adicionales con el sensor de conductividad

Debido a que el sensor de conductividad del equipo SS fue el que mayores diferencias presento con respecto al MP en campo, se hipotetiza que esto podría estar relacionado con que las medidas realizadas de la escorrentía están en los límites de detección del sensor de conductividad y por ende genera mayores errores en la medida. Teniendo en cuenta esto se decide realizar un análisis adicional en laboratorio midiendo con el equipo SS y con el MP frente a soluciones con concentraciones conocidas de conductividad usando KCL y agua destilada en balones aforados. Las concentraciones de KCL fueron elaboradas en laboratorio teniendo en cuenta el *Standard Methods* (American Public Health Association (APHA), 2005) donde se tiene el equivalente en conductividad ideal para cada caso.

La Tabla 18 muestra los resultados de las mediciones tomadas en el laboratorio por el SS, el MP y el valor esperado de acuerdo con los establecido en el *Standard Methods*, el cual corresponde a un promedio de los valores obtenidos (se tomaron duplicados) por cada concentración determinada.

Tabla 18. Datos capturados en laboratorio a diferentes concentraciones de conductividad

Concentración de KCL (M)	<i>Standard Methods</i> (uS/cm)	Multiparámetro (uS/cm)	<i>Smart Sensor</i> (uS/cm)
0.0001	13,11	15.5	50
0.001	129,3	110	160
0.01	1242,6	1267	1240
0.05	5866,7	6173.5	5830
0.1	11343,2	12165	11045
0.2	21824	22400	22010

Fuente: Autora

A partir de los datos mostrados en la Tabla 18 se grafican los datos de la conductividad obtenida para cada una de las concentraciones. La Figura 31 muestra que hay diferencia entre los datos del SS, el MP y lo establecido en el *Standard Methods*. Se observa la misma tendencia lineal que se observa de los datos del *Standar Methods*. Se puede concluir entonces, que a pesar de que hay diferencias en los valores esperados del sensor de EC en las pruebas en campo, se pueden considerar confiables los datos tomados por el SS

con la misma confiabilidad que se toman los del MP en el rango de medición de 0 uS/cm a 20000 uS/cm.

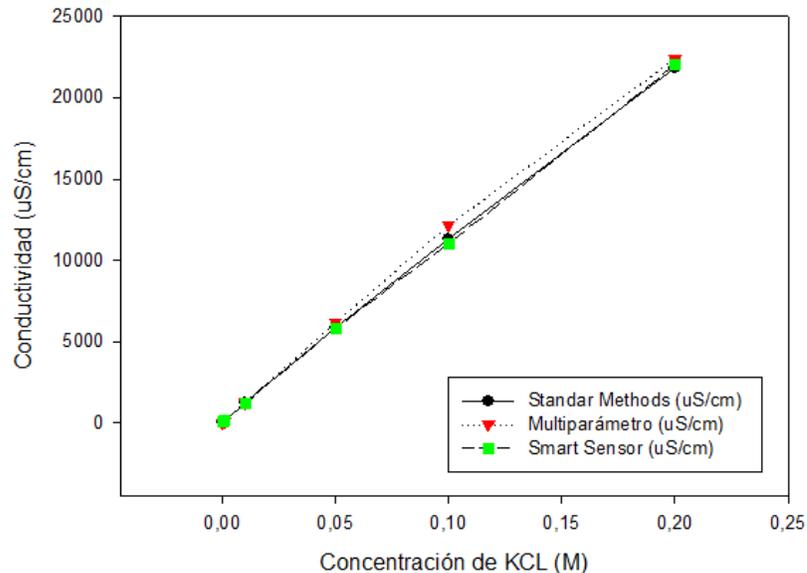


Figura 31. Concentraciones obtenidas con el SS

Fuente: Autora

## 4.5 Versión final del equipo SS para medición puntual.

Debido a que se identificaron fallas en el equipo SS por temas de cableado, sistema de transferencia de datos e impermeabilidad durante el desarrollo de los objetivos 1 y 2 la presente tesis se trabajó de manera paralela en un prototipo que no tenga estas fallas. La Figura 32 muestra los componentes internos del prototipo que está compuesto por el Arduino Uno, los módulos de los sensores de pH, conductividad y temperatura, un módulo bluetooth para la trasmisión de datos y el módulo led que conecta con una pantalla para visualizar los datos leídos por el sensor. En esta figura, se pueden observar cómo se mejoró el cableado del equipo al quitar los cables tipo jumper y remplazarlos por placas soldadas y cableado soldado en todo el equipo. La Figura 33 muestra la parte externa del prototipo que fue realizada en una impresora 3D. En siguiente video muestra el prototipo final generado tanto en el modelado 3D como su versión final funcionando ([https://drive.google.com/drive/folders/1HXxh6onk6lorvcH1DLveB7hfTWbQWTIR?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1HXxh6onk6lorvcH1DLveB7hfTWbQWTIR?usp=drive_link)).

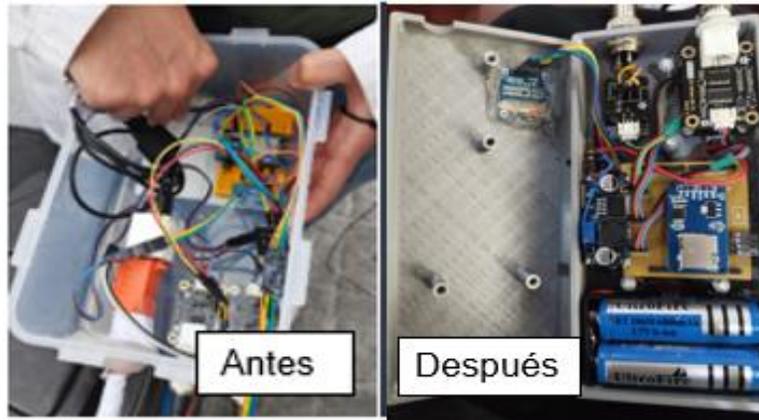


Figura 32. Componentes internos del equipo

Fuente: Autora

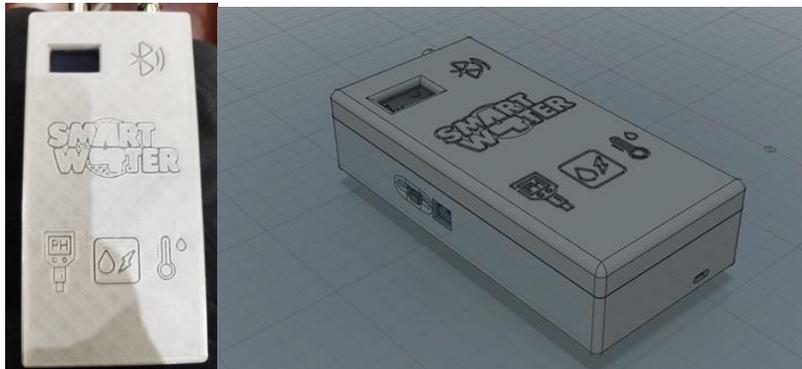


Figura 33. Prototipo final del SS

Fuente: Autora

## 4.6 Ventajas y desventajas del equipo SS final para monitoreo puntual

Con base en los resultados de este capítulo, se determinan las ventajas y desventajas del equipo teniendo en cuenta diferentes factores como precio, facilidad de configuración, uso, entre otras.

Tabla 19. Ventajas y desventajas del equipo SS desarrollado para monitoreo puntual

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- El precio del equipo es 80% más barato que el de multiparámetro comercial con las mismas capacidades y rangos de medición. El costo de la configuración mostrada en la Figura 32 tiene un costo de 1'500.000 (384 US) y el de un multiparámetro Hanna 98194 es de 7'320.000 (1874 US).</li> <li>- Fácil de usar y replicar. Luego de que se programa el SS, el uso es intuitivo y se pueden leer los datos tanto en la pantalla del SS como en un celular al transmitir por Bluetooth.</li> <li>- La versatilidad que tiene el sistema embebido (Arduino), permite que a futuro se puedan conectar más sensores similares a los usados en esta investigación o que midan otros parámetros, así como incluir otros módulos para transmitir los datos como el wifi.</li> <li>- La precisión y la exactitud del equipo es muy similar a la obtenida por un equipo de campo como el multiparámetro para el caso de pH y Temp. Para el caso de EC el equipo SS es más preciso y exacto que el MP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede necesitar el reemplazo de sensores antes que el MP.</li> <li>- Es posible que requiera impermeabilización para condiciones extremas.</li> <li>- La fuente de energía sigue siendo una vulnerabilidad; su conexión a una fuente solar podría generar inestabilidades y errores en las mediciones.</li> <li>- Para alcanzar la misma robustez que el MP, se necesitan materiales y recubrimientos que incrementarían el costo del equipo.</li> <li>- El sensor de pH del SS carece de la capacidad de calibración para el buffer 10.</li> </ul>

Fuente: Autora



## 5. Capítulo 5: Implementación del sensor de bajo costo en un caso de estudio

En este capítulo se muestran los resultados respecto al objetivo tres donde se implementa el sensor de bajo costo en un caso que requiera el monitoreo de la escorrentía superficial con el fin de entender el desempeño del sistema hídrico. Debido a que una de las metas del presente trabajo es generar recomendaciones para realizar el monitoreo de la escorrentía superficial capturada por estructuras SUDS, se plantea el monitoreo de un *Rain Barrel* o tanque de lluvia que fue construido en el 2020 por medio de un proyecto financiado por la DIEB de la Universidad Nacional de Colombia, donde se evaluaba la implementación de SUDS en el campus (Mancipe et al., 2022). Para este caso se usa una nueva versión del equipo SS mejorado que se llamará SS-IoT (porque integra tecnología IoT para monitoreo continuo). A diferencia de los equipos utilizados en los capítulos anteriores, el SS-IoT cuenta con un sistema embebido ESP32 que incluye un módulo de conexión wifi para realizar la transmisión de datos en tiempo real. El equipo SS-IoT fue ubicado en el tanque de lluvia al cual se conectaron los sensores de pH, conductividad y temperatura. Adicionalmente, se registró el nivel de agua dentro del tanque con el fin de evaluar el desempeño de un sensor de ultrasonido en monitoreo continuo. Desafortunadamente, debido a que el laboratorio de hidráulica no funcionó durante el 2023, no se logró hacer pruebas del sensor de nivel en condiciones controladas como se realizó para los sensores de calidad del agua. El SS-IoT registró datos durante el mes de octubre de 2023. En este periodo se buscaba evaluar la conectividad de los sensores, transmisión de los datos y la congruencia del dato teniendo en cuenta las características esperadas para el *Rain Barrel*. Para este objetivo de igual manera se desarrolló una plataforma online que registraba los datos tomados por el equipo y los transmitía en tiempo real bajo un esquema de IoT. Esto con el fin de poder transmitir los datos a la página web. Con las mediciones de calidad (pH,

EC y Temp) más las mediciones de niveles en el *Rain Barrel*, se espera evaluar el desempeño del equipo SS para monitoreo continuo y el uso de los datos para evaluar el desempeño del sistema hídrico, en este caso de un SUDS. Se espera identificar los retos adicionales que pueda tener el uso de este equipo para el monitoreo continuo. La Figura 34 muestra el esquema el resumen gráfico del presente objetivo. Es importante aclarar que todo el sistema planteado en este subcapítulo fue alimentado energéticamente por medio de corriente directa. Se realizaron algunas pruebas con varios sistemas alternativos de energía como el uso de baterías y la energía solar. Sin embargo, estos métodos no resultaron eficientes y se tomó la decisión de alimentar el equipo SS-IoT con corriente directa conectándolo por medio de una extensión al punto de conexión más cercano al tanque.

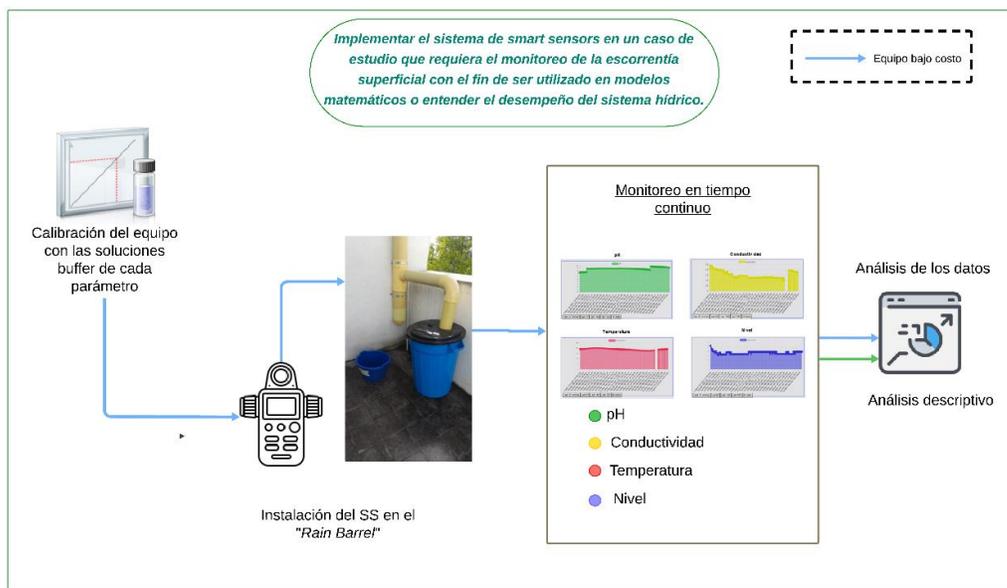


Figura 34. Resumen gráfico capítulo 5

Fuente: Autora

## 5.1 Selección del punto de monitoreo

Debido a que en el 2020 se implementa un tanque de lluvia en la terraza del edificio IEI en la Universidad, el cual capta la escorrentía de una parte de la cubierta de este edificio, se considera el uso de esta estructura SUDS para realizar el monitoreo continuo (ver Figura 35). El SUDS considera la captura de la escorrentía proveniente

de una porción de la cubierta del IEl (ver Figura 36), donde se separa el primer lavado (*first flush*) y posteriormente se llena el tanque de lluvia. En este tanque se sumergen los sensores de pH, conductividad y temperatura al igual que ubicar el sensor de nivel en la parte superior del tanque. El diseño se realiza con tuberías de PVC y es mostrado en la Figura 37.



Figura 35. Rain Barrel

Fuente: (Mancipe et al., 2022)



Figura 36. Vista aérea del sistema de recolección del agua lluvia

Fuente:.(Mancipe et al., 2022)

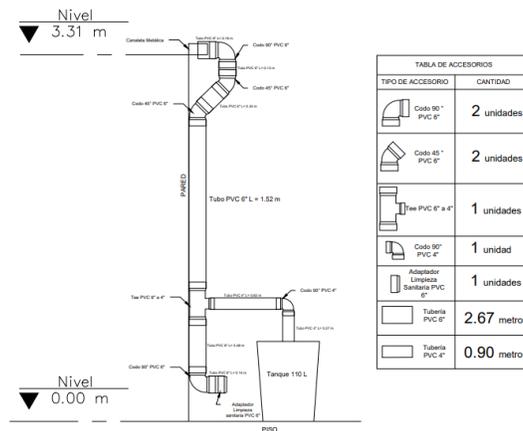


Figura 37. Diseño del sistema de recolección de agua lluvia

Fuente:.(Mancipe et al., 2022)

## 5.2 Captura y transmisión de los datos

Una de las lecciones aprendidas en el 2020 con la implementación del taque de almacenamiento es que la mayoría de los eventos de lluvia ocurrían luego de las 3 pm y en horas de la noche. Por lo cual se determinó necesario crear una alternativa para la captura de datos en las noches y los fines de semana, tal como las herramientas del internet de las cosas (IoT). En esta investigación se evaluó la implementación de un equipo que permitiera capturar la información en tiempo real y que dicha información se pudiera transmitir de manera online y que pudiera ser visualizada fácilmente en una página web.

Sin embargo, en el momento en que se iba a realizar la instalación del equipo SS-IoT se identificó que el uso del Arduino Uno no era el sistema embebido más adecuado para la captura y transmisión de los datos. Por tanto, se cambió al sistema embebido ESP32. La Tabla 20 muestra las diferencias entre ambos sistemas y lo que facilitó la decisión de usar el ESP32 como parte de este tercer objetivo.

Tabla 20. Criterios para la selección del sistema embebido que permitiera aplicaciones IoT

<b>Criterio</b>	<b>Arduino Uno</b>	<b>ESP32</b>
Transmisión de información online	Se debe incluir un módulo adicional de wifi o bluetooth que pueda transmitir los datos. Son módulos que presentan muchas fallas en su configuración.	Tiene incorporado comunicación <i>bluetooth</i> y wifi para transmitir los datos. La programación es sencilla y permite conectar el sistema embebido a la nube con mucha facilidad.
Programación	Se pueden utilizar el código sugerido por el fabricante para la captura de los datos.	Es necesario realizar modificación al código debido a que las librerías del Arduino Uno no son leídas por el ESP32.
Compatibilidad con los sensores de calidad del agua	Si.	Si.
Permiten conexión en la nube	No. La única manera de lograrlo es por medio de un módulo wifi.	Si.
Costo	27.000 COP (7 US) aproximadamente	27.000 COP (7 US) aproximadamente

Fuente: Autora

Luego de seleccionado el equipo se realizó la conexión y configuración en la versión SS-IoT. Esta versión cuenta con [1] una caja principal que contiene el sistema embebido, los circuitos que convierten la señal de los sensores y un modem wifi para transmitir los datos del ESP32 (ver Figura 38 a ), [2] los sensores de pH, EC, Temp que se sumergieron en el *Rain Barrel* (ver Figura 38 b ) y [3] el sensor de nivel que fue instalado dentro del *Rain Barrel* (ver Figura 38 c ).

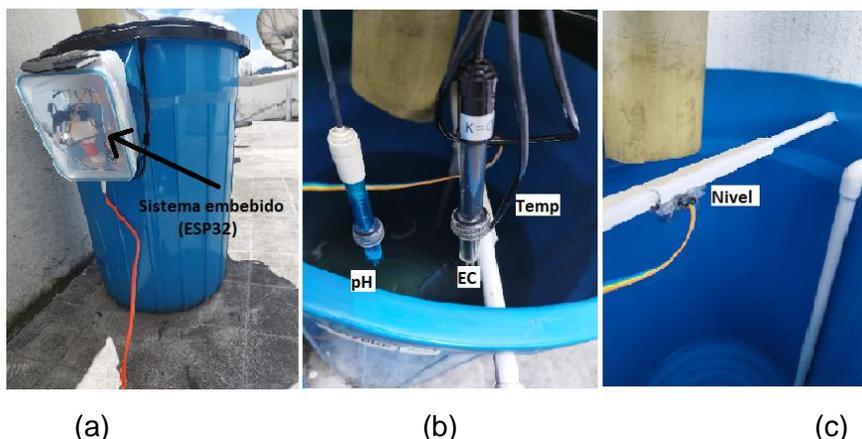


Figura 38. Equipo SS-IoT. (a) Caja principal con el sistema embebido y circuito de conexión, (b) sensores de pH, EC y Temp que fueron sumergidos en el Rain Barrel y (c) sensor de nivel

Fuente: Autora

El sensor de nivel utilizado y sus características se pueden observar en la Tabla 21. Este sensor de nivel es de fácil configuración - programación y por esto es por lo que se consideró en este proyecto.

Tabla 21. Sensor de nivel

Parámetro	Sensor	Características
Nivel	 <p>Figura 39. Sensor Medidor De Distancia Ultrasonido Hc-sr04</p>	<p>Dimensiones del circuito: 43 x 20 x 17 mm                      Tensión de alimentación: 5 Vcc                      Frecuencia de trabajo: 40 KHz                      Rango máximo: 4.5 m                      Rango mínimo: 1.7 cm                      Duración mínima del pulso de disparo (nivel TTL): 10 <math>\mu</math>S.                      Duración del pulso eco de salida (nivel TTL): 100-25000 <math>\mu</math>S.                      Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra 20 mS.</p>

Fuente: Autora. Tomado de: (Valle, 2017)

Es importante aclarar que el cambio del Arduino al ESP32 y la transmisión de los datos a la nube generó cambios en la programación del sistema embebido. El **Anexo D: Código de programación para muestreo continuo *Smart Sensor*** muestra el código utilizado en esta fase. Luego de programados y configurados los sensores se generó una plataforma web que transmitiera la información de los sensores y publicara dicha información en tiempo

real. La Figura 40 muestra el esquema general de cómo se captura y transmite esta información.

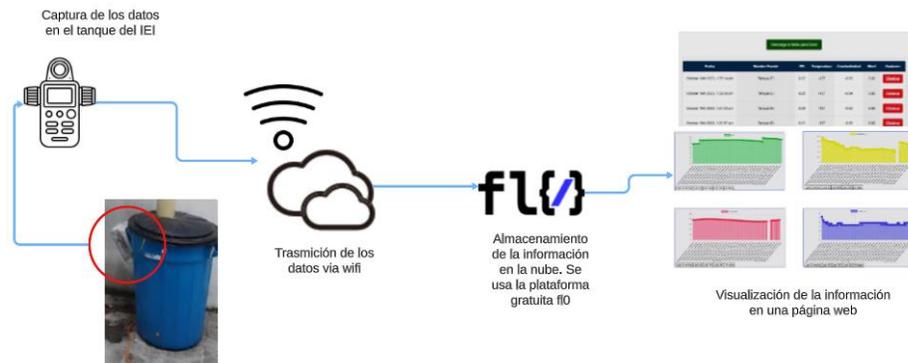


Figura 40. Esquema para el monitoreo continuo con el equipo SS-IoT.

Fuente: Autora.

Como se observa en la Figura 40 el procedimiento consiste en:

[1] Se instalan y ubican los sensores dentro del *Rain Barrel* que miden pH, EC, Temp y nivel del agua.

[2] Estos datos son transmitidos vía wifi a una plataforma en la nube que almacena los datos. El wifi utilizado para transmitir los datos proviene de un modem que fue utilizado en la presente investigación únicamente para transmitir estos datos. La nube en la cual fueron almacenados los datos se llama fL{ }, la cual es una plataforma gratuita en la cual se pueden almacenar los datos (ver Figura 41). Esta plataforma es fácil de configurar y solo requiere que se creen las variables de la información que uno está almacenado para posteriormente conectarlo a la página web.

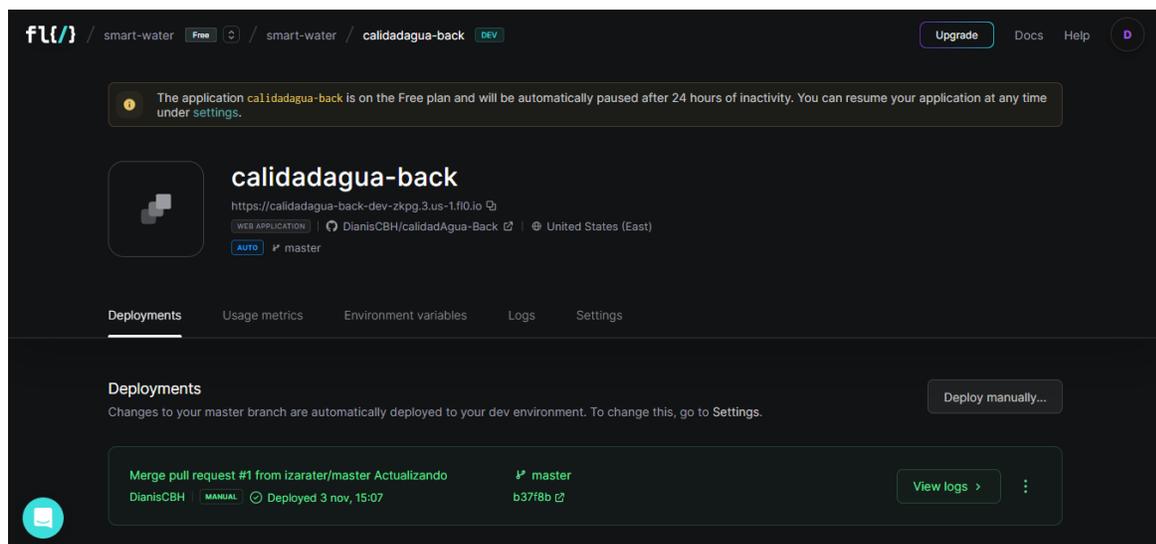


Figura 41. Nube gratuita de datos fl{}

Fuente: Autora Tomado de (*FLO - Backend Engineering, Supercharged*, n.d.)

[3] Se configura la página web en la cual se va a desplegar la información. Para lograr esto se programa el *backend* (parte que se conecta con la base de datos y el servidor) y el *frontend* (parte que ve el usuario de la página) para desplegar la información por internet. Esta página web muestra la lectura obtenida por cada uno de los sensores en tiempo real y se grafica cada una de las variables. La página web es configurada con ayuda de estudiantes de pregrado del programa de ingeniería de sistemas. Igualmente, se puede ver el historial de los datos en una tabla que permite descargar los datos en formato .csv para ser manipulado por el usuario. La página web creada se encuentra en el siguiente link: <https://smartwater.vercel.app/>.

### 5.3 Datos recopilados en campo

Luego de configurado el equipo SS-IoT y anclado al tanque de lluvia, se procede a realizar el monitoreo en tiempo real. Para esto se logra capturar información horaria entre el 17 de julio y el 2 de noviembre del 2023 en la página web. Sin embargo, solo para el mes de octubre de 2023 se lograron capturar la mayoría de los datos confiables y se toman estos datos para el análisis de la información. A continuación, se plasman lo resultados obtenidos durante este monitoreo.

### 5.3.1 Monitoreo y fallas generadas durante el monitoreo

La Tabla 22 muestra la bitácora de los meses en los cuales se realizó el monitoreo continuo con el SS-IoT.

Tabla 22. Bitácora de los meses monitoreados

Mes	# de datos capturados / # de datos esperados	Fallas presentadas
Julio 2023	158/312	Los datos capturados fueron entre el 17 de julio y el 29 de julio. Sin embargo, por fallas eléctricas (i.e. energía, conexión Wifi, falla en el sensor) los días 19, 20 y 21 de julio no se registraron datos. Durante este mes se presentaron varias fallas con el sensor de conductividad y pH que llevaron a hacer cambios en cableado y la programación. Por lo tanto, estos datos no son útiles para realizar un análisis. Debido a que el porcentaje de falla del equipo supera el 30% se descarta este mes para el análisis del monitoreo.
Agosto 2023	2/744	Luego de que iniciaron las clases en el mes de agosto, la red de wifi de la universidad se saturó y los datos no se transmitían debido a la inestabilidad de la red de la universidad. Se realizaron varios cambios en el módulo wifi sin embargo las fallas persistieron. Durante el mes de agosto y
Septiembre 2023	0/720	septiembre se realizaron gestiones para ubicar un módulo wifi propio que le diera internet exclusivo al módulo ESP32. Sin embargo, solo hasta finales de septiembre se logró esta gestión y se logró la transmisión de datos. Debido a que el porcentaje de falla del equipo supera el 30% se descartan estos meses para el análisis del monitoreo.

Mes	# de datos capturados / # de datos esperados	Fallas presentadas
Octubre 2023	559/744	Durante el mes de octubre se logró la captura de varios datos durante todo el mes. Se observaron otras fallas en el equipo en cuanto a la conexión de los sensores. Se toma este mes como el periodo de análisis para analizar en detalle los diferentes tipos de fallas presentadas. En el apartado 5.3.2 se detalla este monitoreo logrado en el mes de octubre. El porcentaje de falla no supera el 25%.

Fuente: Autora

### 5.3.2 Evaluación del desempeño del equipo para el mes de octubre de 2023

Para determinar si un dato recibido por el equipo era confiable o no, se visualizan los datos semana a semana y se procesan de acuerdo con el algoritmo no automatizado mostrado en la Figura 42. Los tres pasos del proceso mostrados en la Figura 42 permiten definir 3 categorías de falla de los datos, en donde: [1] Fallo categoría 1: se inicia la verificación del registro del SS en busca de mensajes de error o en donde no se registró dato, es decir, donde el equipo falló por temas de energía, internet o conexión del sensor, [2] Fallo categoría 2: se realiza un análisis de valores atípicos que físicamente no son posibles y que son asignados por el equipo de manera automática al tener un error de medición (e.g. para el caso de temperatura se asignan un valor de  $-127^{\circ}\text{C}$ ). Estos valores se eliminan del registro, [3] Fallo categoría 3: finalmente, se eliminan los valores para la hora y fecha en donde el valor de pH es  $> 8.5$ , el de EC  $> 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$  y Temp  $> 30^{\circ}\text{C}$  debido a que son valores que superan los rangos esperados de lluvia (Ideam & Invemar, 2021) y se pueden considerar atípicos. Luego de esto los datos que quedan de este filtrado son los utilizados en el análisis.

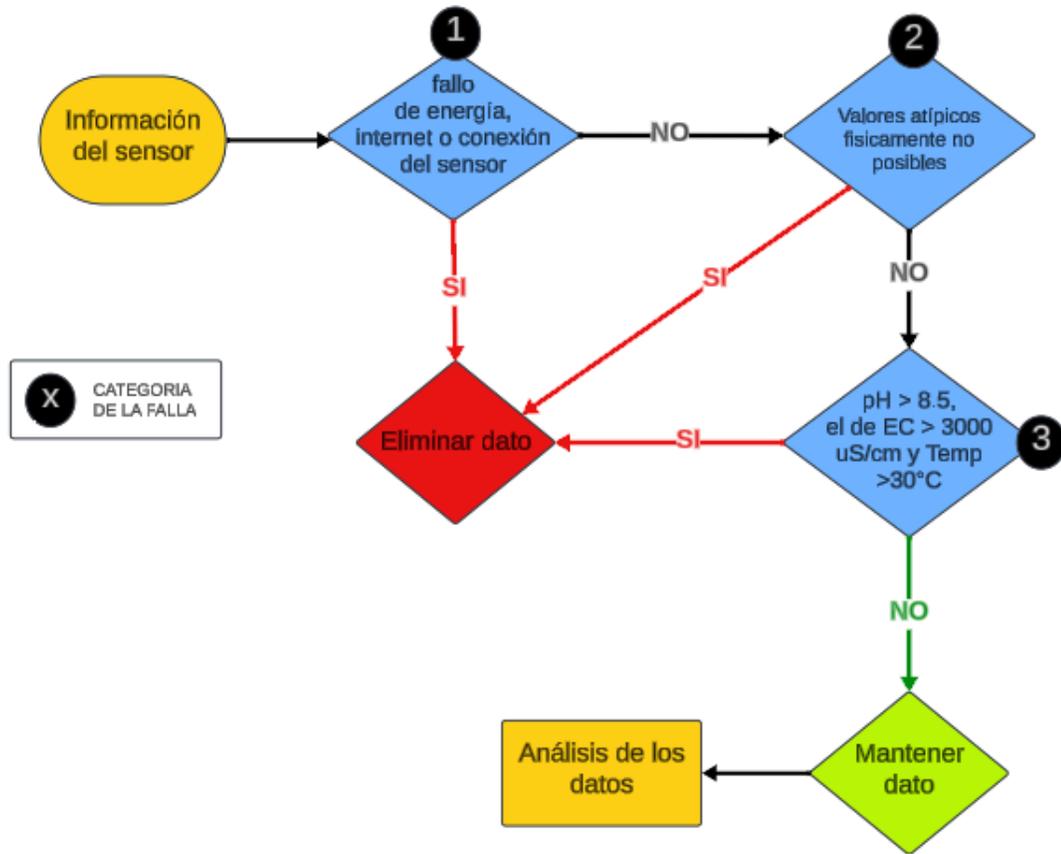


Figura 42. Categorización de los errores presentados por el equipo

Fuente: Autora

Teniendo en cuenta lo mostrado en la Figura 42, se realiza una evaluación de los datos horarios capturados discriminados en cada uno de los parámetros analizados en el monitoreo continuo del mes de octubre de 2023.

- **Parámetro de pH**

Los datos obtenidos para el caso de pH durante del mes de octubre de 2023 se pueden observar en la Figura 43, en donde se puede apreciar al costado derecho la categoría de colores en las que se organizaron los datos incluyendo los valores que no contienen datos.

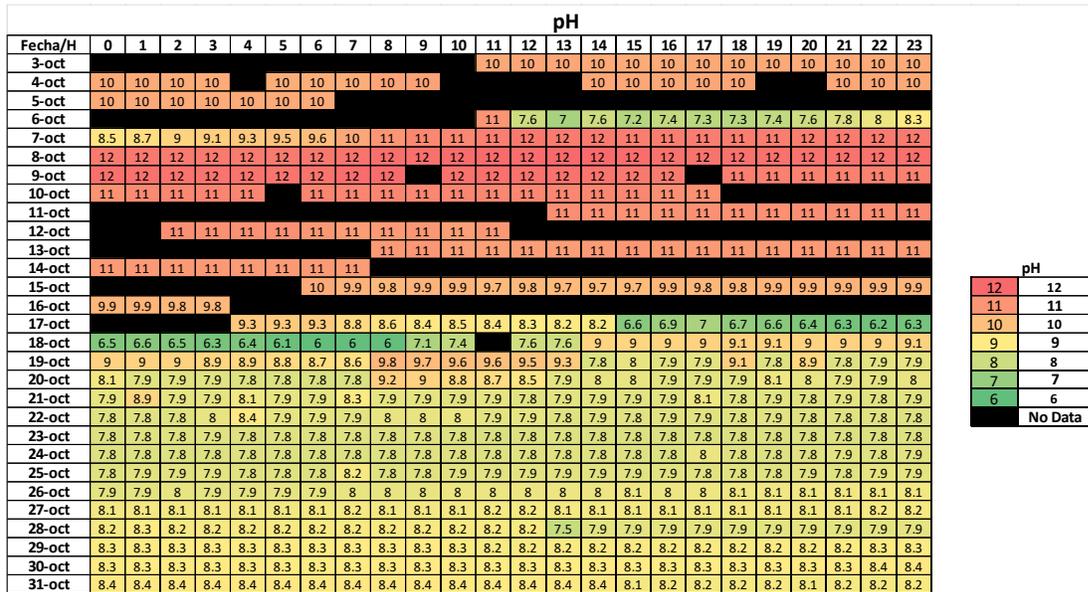


Figura 43. Datos obtenidos por el SS para pH

Fuente: Autora

Al analizar los datos semana a semana (ver Tabla 23) para pH, las dos primeras semanas se eliminan el 92.9% y el 91.1% de los datos totales capturados en este periodo frente a la semana 3 y 4 en donde solo se eliminan el 19.6% y el 0% de los datos. La mayoría de los errores presentados en las primeras semanas y que prevalecen en todos los parámetros es con respecto a la trasmisión de los datos a la página web, resultando en puntos sin datos. En este caso el sensor de pH no presenta errores de la categoría 2 (i.e. errores atípicos con valores físicamente imposibles), debido a que el equipo por defecto no asigna un valor aleatorio cuando el sensor trasmite mal un dato, sino que mantiene reportando valores muy cercanos al último que haya medido válidamente.

Tabla 23. Falla presentada por categoría para el parámetro de pH

Semana	Valor prom. de los datos (pH)	# de datos esperados	# de datos con error tipo 1	# de datos con error tipo 2	# de datos con error tipo 3	Total, de datos eliminados
3 – 10 de oct	10.7 pH	168	53	0	103	156
11 – 17 de oct	9.8	168	80	0	73	153
18 – 24 de oct	7.9	168	1	0	32	33
25 – 31 de oct	8.1	168	0	0	0	0

Fuente: Autora

• **Parámetro de conductividad**

Los datos obtenidos para el caso de conductividad durante del mes de octubre se pueden observar en la Figura 44 en donde se puede apreciar al costado derecho la categoría de colores en las que se organizaron los datos incluyendo los valores que no contienen datos.

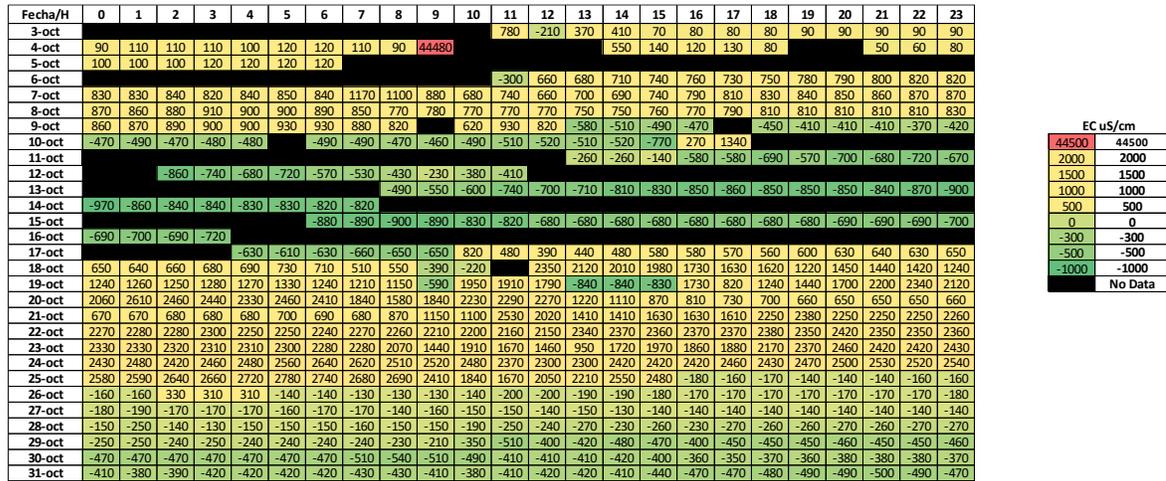


Figura 44. Datos obtenidos por el SS para conductividad

Fuente: Autora

Al analizar los datos semana a semana (ver Tabla 24) podemos ver que para el caso de conductividad las semanas 1, 2 y 4 se eliminan el 48.2%, el 91.1% y el 88.7% de los datos totales capturados en este periodo frente a la semana 3 en donde solo se eliminan el 4.2% de los datos. En este caso se observa que varios datos de los registrados por el equipo eran negativos y esto los categorizó dentro del error tipo 2 debido a que no se hace referencia a un error en la transmisión de los datos sino al registro del sensor en sí.

Tabla 24. Falla presentada por categoría para el parámetro de conductividad

Semana	Valor prom. de los datos(μS/cm)	# de datos esperados	# de datos con error tipo 1	# de datos con error tipo 2	# de datos con error tipo 3	Total, de datos eliminados
3 – 10 de oct	0.7	168	53	1	27	81
11 – 17 de oct	0.6	168	80	73	0	153
18 – 24 de oct	1.7	168	1	6	0	7
25 – 31 de oct	2.1	168	0	149	0	149

Fuente: Autora

● **Parámetro de temperatura**

La Figura 45 presenta los datos obtenidos para temperatura en octubre de 2023, en donde se puede observar al costado derecho la categoría de colores en las que se organizaron los datos incluyendo los valores que no contienen datos.

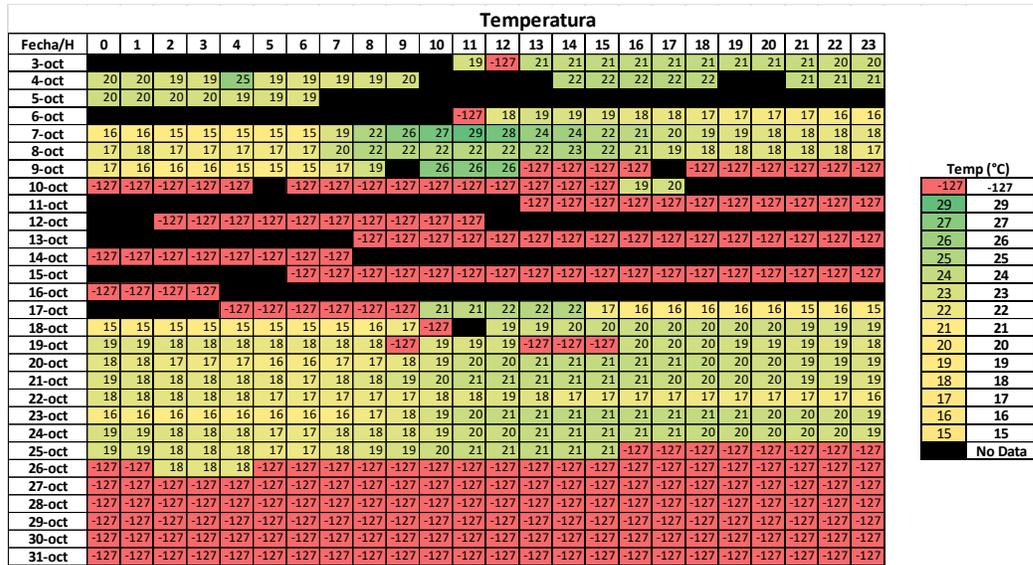


Figura 45. Datos obtenidos para temperatura del mes de octubre

Fuente: Autora

Al analizar los datos semana a semana (ver Tabla 25) se observa que las semanas 1, 2 y 4 se eliminan el 38.7%, el 91.1% y el 88.7% de los datos totales capturados frente a la semana 3 en donde solo se eliminan el 3.6% de los datos. Debido a que las lecturas de pH y EC dependen de la temperatura, los resultados presentados en la Tabla 25 permiten inferir que una posible falla en el sensor de temperatura podría explicar el fallo en los otros sensores para las mismas fechas y horas. Sin embargo, para el sensor de pH, el cual no fallo la semana 4, no se observan fallos con valores físicamente imposibles debido a que este sensor siempre emite una señal al sistema embebido entre 0 y 14 unidades de pH, Por lo tanto, no se le puede detectar las causas por las que falla el sensor de pH. Una falla en el sensor de temperatura podría invalidar la información obtenida por los sensores de pH o EC y por ende no se podrían tener en cuenta estos datos. En general, el sensor de temperatura presenta una falla 3.

Tabla 25. Falla presentada por categoría para el parámetro de temperatura

Semana	Valor prom. de los datos(°C)	# de datos esperados	# de datos con error tipo 1	# de datos con error tipo 2	# de datos con error tipo 3	Total de datos eliminados
3 – 10 de oct	19.5	168	53	12	0	65
11 – 17 de oct	18	168	80	73	0	153
18 – 24 de oct	18.5	168	1	5	0	6
25 – 31 de oct	18.9	168	0	149	0	149

Fuente: Autora

• **Parámetro de nivel**

Los resultados obtenidos para niveles durante el monitoreo del mes de octubre se pueden apreciar en la Figura 46, junto a la categoría de colores en las que se organizaron los datos incluyendo los valores que no contienen datos, al costado derecho.

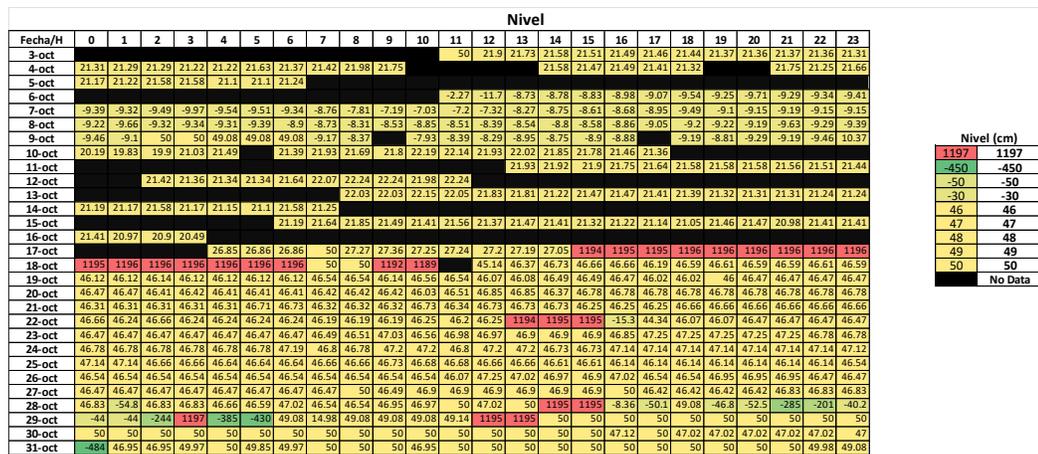


Figura 46. Datos obtenidos del SS para niveles

Fuente: Autora

Los valores de niveles (lámina de agua) obtenidos por encima de los 3 cm muestran que el tanque estaba vacío y los valores cercanos a 50 cm muestran que el tanque se encontraba en lleno a toda su capacidad. Entonces, es interesante ver como a lo largo del mes se fueron registrando los momentos en los cuales se iba llenando y vaciando el *Rain Barrel*. Al contrastar esta información con los datos de una estación de lluvia de la red de calidad del aire de Bogotá llamada “Centro de alto rendimiento” de la Red de calidad del aire de Bogotá. Se elige esta estación debido a que presenta información de lluvia en tiempo casi real y se puede verificar con facilidad los datos de lluvia y otros parámetros

relacionados con la calidad del aire. Se observa que para la fecha del 9 de octubre desde las 11 pm hasta las 5 am se registró un evento de lluvia de 4.3 mm que llenaron el tanque hasta la mitad. Luego el evento del 17 de octubre que ocurre entre las 4 y 5 pm de 15.4 mm fue tan fuerte que el sensor de nivel fallo y nuevamente registró datos horas después mostrando que el tanque se había llenado completamente. Este fallo se pudo dar debido a un fallo energético o de wifi que ocurrió durante el evento de lluvia. Luego de este evento no se registran otros eventos de lluvia hasta el 28 de octubre, donde nuevamente se presentaron fallas en la lectura del sensor. Es por esto, que hasta el 28 de octubre se mantiene el tanque lleno. Es importante aclarar que se diseñó un sistema de vaciado tipo sifón en PVC el cual tenía el propósito de que el tanque se fuera desocupando de manera automática al llenarse completamente. Sin embargo, luego de que se llenó el tanque el 17 de octubre, al parecer no se desocupó y en el momento en el que nuevamente llovió el 28 de octubre se mostraba la misma lectura de nivel y posteriormente una falla en la conexión del sensor de nivel generó errores durante la última semana de octubre.

Tabla 26. Fallo presentado por categoría para el parámetro de nivel

Semana	Valor promedio de los datos (cm)	# de datos esperados	# de datos con error tipo 1	# de datos con error tipo 2	# de datos con error tipo 3	Total, de datos eliminados
3 – 10 de oct	5.7	168	53	0	6	59
11 – 17 de oct	22.6	168	80	0	10	90
18 – 24 de oct	46.2	168	1	0	14	16
25 – 31 de oct	46.4	168	0	0	83	83

Fuente: Autora

En la Tabla 26 se puede ver que, para los niveles de las semanas 1, 2 y 4 se eliminan el 35.1%, el 53.6% y el 49.4% de los datos totales capturados en este periodo frente a la semana 3 en donde solo se eliminan el 9.5% de los datos.

La Tabla 27 resume las categorías de fallas para cada parámetro. De manera general se encuentra que el error más común es el tipo 1 con 20% durante las 4 semanas para los cuatro sensores. Esto refuerza el hecho de que se debe garantizar un sistema alternativo de almacenamiento de los datos para que este 20% en promedio de datos perdido en un mes se pueda reducir si la falla proviene de errores en la transmisión de los datos. Posteriormente, el segundo fallo más común es el tipo 3, aunque solo se presentó para los

sensores de EC y Temp, se pierde más del 30% de los datos al fallar la medición de estos sensores y registrar valores que físicamente no son posibles. Esto quiere decir, que es muy importante continuar mejorando un suministro de energía constante, la conexión y la transmisión de los datos para reducir esta pérdida de datos. Por último, se evidencia que la presencia de datos anómalos, los cuales puedan estar por fuera del rango esperado de valores de cada parámetro no es crítica para EC, Temp ni para el nivel del agua. Pero para pH si se presenta un fallo que supera más del 30%. Esto sugiere que se debe continuar revisando otros sensores de pH que sean más precisos y exactos, aún si su costo pueda incrementarse respecto al que se usó en el presente estudio.

Tabla 27. Resumen de las fallas para cada parámetro

Semana	Falla tipo 1 (%)				Falla tipo 2 (%)				Falla tipo 3 (%)			
	pH	EC	Temp	Nivel	pH	EC	Temp	Nivel	pH	EC	Temp	Nivel
1	31.6	31.6	31.6	31.6	0	0.6	7.1	0	61.3	16.1	0	3.6
2	47.6	47.6	47.6	47.6	0	43.5	43.5	0	43.5	0	0	6
3	0.6	0.6	0.6	0.6	0	3.6	3	0	19.1	0	0	8.3
4	0	0	0	0	0	88.7	88.7	0	0	0	0	49.4
<b>Prom</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>34.1</b>	<b>35.6</b>	<b>0</b>	<b>31</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>17</b>

Fuente: Autora

Debido a que la semana 3 (datos entre el 18 de octubre y el 24 de octubre) es en la que se observan fallos que no superan el 30% de todas las categorías, se toman estos valores como válidos y se genera un análisis de la información de los datos capturados en esa semana. A continuación, se muestra el análisis del desempeño de la estructura monitoreada a partir de estos datos.

## 5.4 Desempeño de la estructura monitoreada

La evaluación del desempeño de la estructura SUDS se presenta para los datos obtenidos en campo por medio del monitoreo continuo en las fechas del 18 al 24 de octubre sin tener en cuenta los datos eliminados en el numeral 5.3. Se evalúan dos aspectos: [1] La distribución de los datos de cada variable y [2] la correlación entre los parámetros obtenidos durante el monitoreo incluyendo los valores de precipitación que ocurrieron durante esa semana. Es importante aclarar que el desempeño esta dado frente a el uso

del SS-IoT frente a la calidad del agua y no se está evaluando el desempeño del SUDS. Esto debido a que para evaluar el desempeño del SUDS se requiere monitorear a la entrada y a la salida de la estructura y en este caso solo se monitoreo adentro de la estructura por temas logísticos.

## Evaluación del desempeño de los datos obtenidos en el monitoreo continuo del SUDS

La Figura 47 muestra los datos reportados en el IoT para la semana del 18 al 24 de octubre de 2023. Estos datos ya tienen filtrados los valores que fueron considerados como fallo anteriormente. De este monitoreo se calcula el promedio de los valores para la semana de cada parámetro en donde se tiene 7.9 de pH, 1970  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad, 18.7 de temperatura y 46.6 cm de nivel (lámina de agua).

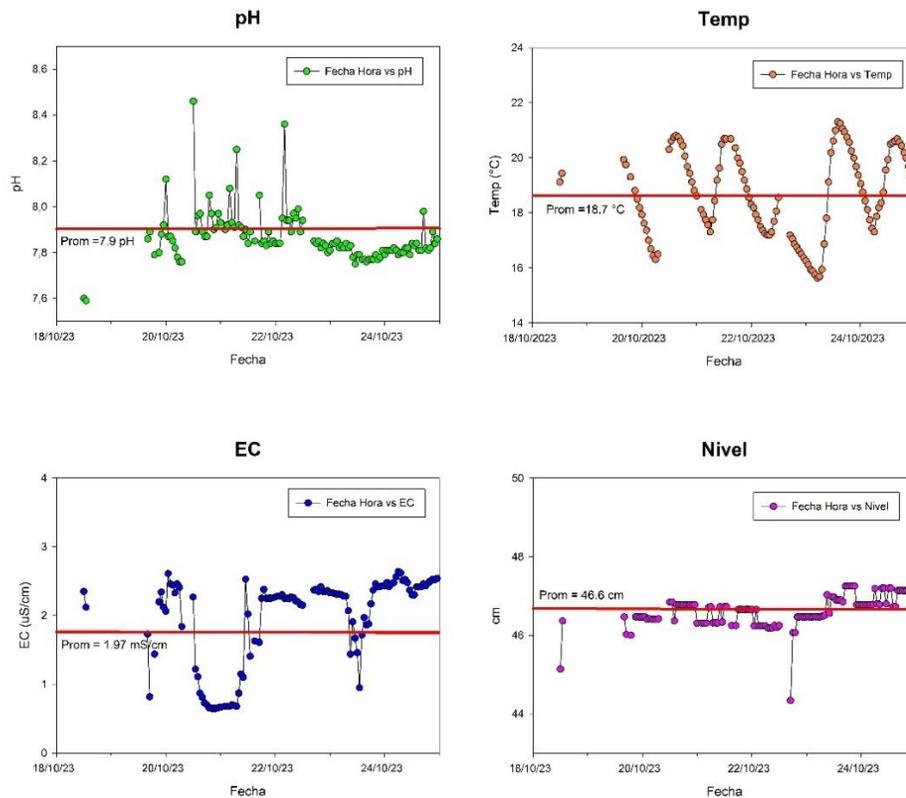


Figura 47. Datos filtrados para el monitoreo continuo entre el 18 y 24 de octubre

Fuente: Autora

De acuerdo con análisis de laboratorio realizados a muestras de escorrentía para la misma cubierta en el proyecto del 2020, se encontró que el valor de pH promedio de una serie de monitoreos durante el mes de septiembre de 2020 (ver Tabla 28) fue de 7.4 unidades de pH y 61.47  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para la conductividad (promedio de 1970  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Mancipe et al., 2022). Estos valores fueron tomados dentro del tanque y se tienen en cuenta para comparar el desempeño de medición del SS-IoT asumiendo que la calidad del agua medida en septiembre de 2020 pueda ser similar a la esperada en octubre de 2023.

Tabla 28. Características de los eventos de lluvia muestreados

Evento	Fecha	Inicio del evento	Final del evento	Volumen (L)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	12 sep	3.35 pm	4.30 pm	65	7.13	38.1
2	16 sep	2 pm	4 pm	23	7.37	32.3
3	19 sep	4.13 pm	6 pm	46	7.70	114
Prom				44.67	7.40	61.47

Fuente: (Mancipe et al., 2022)

Los resultados tomados con el SS-IoT podrían indicar que el equipo esta sobreestimando ligeramente el valor del pH y significativamente el valor de EC comparado con lo obtenido en el 2020. En una de las verificaciones realizadas en campo de los sensores se observó que se generaba una biopelícula en los sensores que puede estar produciendo estos errores en las mediciones de los equipos y en especial del sensor de conductividad (Delgado et al., 2021). La formación de la biopelícula es probable por la presencia de nutrientes, microorganismos y materia orgánica los cuales fueron detectados en concentraciones importantes en el estudio de Mancipe et al (2022). Incluso, si observamos los datos promedio de la conductividad a lo largo del mes de octubre (ver la Tabla 24) se aprecia como la primera semana el promedio es de 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en la última semana es de 2100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  indicando un incremento en la medida del 300%, lo que no corresponde a lo esperado debido a que no existe un aporte de agua o agente externo que pueda estar aumentando la conductividad del agua en el sistema, pero si se puede dar por la presencia de biopelículas en el equipo. Es importante indicar que el sensor fue instalado en junio de 2023 y estos datos corresponden a octubre de 2023. Por lo cual el lapso de 4 meses antes de octubre pudo haber generado una biopelícula en el sensor que podría explicar porque

desde inicios del mes ya se estaba sobreestimando el valor de la conductividad respecto a lo esperado (i.e. 63.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Para el caso de temperatura no se tiene un valor para comparar. Sin embargo, en la Figura 47 se ve que la temperatura aumenta y disminuye durante la semana corresponde a la variación de temperatura que ocurría durante el día y la noche y que fue perfectamente identificado por el sensor.

Para el sensor nivel, durante la semana con datos válidos no se presentó ningún evento de lluvia y los valores registrados corresponden al tanque lleno. Se observa ruido en las mediciones de nivel obtenidas por el equipo. Sin embargo, si nos proporciona una idea del nivel en el cual se encuentra el agua dentro del *Rain Barrel*. Futuras investigaciones deberían enfocarse en estudiar diferentes tipos de sensores de nivel (i.e. ultrasonido y radar) que produzcan menos ruido en las mediciones y en vincular curvas volumen-profundidad para estimar el caudal.

## 5.5 Ventajas y desventajas del equipo SS-IoT para monitoreo continuo

Teniendo en cuenta los resultados y análisis presentados en el presente capítulo, en la Tabla 29 se establecen las ventajas y desventajas del equipo SS-IoT teniendo en cuenta diferentes factores como precio, facilidad de configuración, uso, entre otras.

Tabla 29. Ventajas y desventajas el SS en monitoreo continuo

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- El precio de esta configuración es de 1'800.000 (461 US). No hay punto de comparación con equipos comerciales que cumplan la misma función.</li> <li>- Aumenta 300mil pesos comparado con el modelo final de monitoreo puntual.</li> <li>- Fácil de usar y replicar.</li> <li>- Que los datos sean transmitidos a una página web, permite que cualquier persona pueda consultar la información en cualquier momento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se requiere realizar la programación y configuración del equipo SS IoT.</li> <li>- Fallas en el wifi pueden generar perdidas en los datos. Siendo este error el que más se presentó en esta investigación. Esto obliga a considerar que se instale una memoria en el equipo como sistema de respaldo.</li> <li>- El equipo requiere que el cableado y el hardware este bien realizado para evitar que esto genere ruido y datos erróneos. Otros dispositivos,</li> </ul>

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La versatilidad del sistema embebido ESP32 permite que a futuro se puedan conectar más sensores de pH, EC o Temp u otros parámetros disponibles.</li> <li>- Se ahorran costos en módulos de transmisión de datos al contar con sistema bluetooth y wifi</li> </ul>	<p>como GatorByte desarrollado por Agafe &amp; Bean (2023) que mide temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y pH, encontraron problemas similares relacionados con el hardware del equipo.</p>

## 5.6 Oportunidades de mejora y trabajo a futuro que se le pueden realizar al SS-IoT

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación se identificaron cuatro aspectos críticos cuando se habla de monitoreo continuo. Estos son el cableado, la alimentación de energía de los equipos, el sistema de transmisión de los datos y la generación de biopelículas en los sensores luego de estar sumergidos por varias horas en el un cuerpo de agua. Estas problemáticas son en muchos casos, poco mencionadas en la bibliografía académica y no se encontraron referencias en las cuales se genere un listado de recomendaciones que atiendan estas problemáticas. Sin embargo, teniendo en cuenta la experiencia de la autora en la presente investigación algunas de las oportunidades de mejora para estos equipos serian:

### 1) Cableado

- Usar cables que trasmitan datos analógicos (cable coaxial, fibra óptica, cable de par trenzado) y no los cables tipo jumper, que son los cables más usados en con los proyectos de Arduino y ESP32. Las señales que trasmiten datos son más sensibles al ruido.
- Utilizar una fuente independiente para el microcontrolador (Arduino/ESP32).
- No utilizar cables largos y tratar de reducirlos al máximo.
- Utilizar componentes de buena calidad, con un diseño de bajo ruido.
- En sensores analógicos utilizar filtros de ruido, estos se pueden conectar en los cables de los sensores.
- Intentar controlar el ruido en la fase de diseño de nuestro proyecto. Los problemas por ruido son comunes y es importante tener en cuenta este aspecto desde el inicio.

### 2) Sistema de energía

- Evitar el uso de sistemas de energía que no generen una alimentación de corriente estable en el equipo. Esto puede hacer que se pierda la señal y por ende los datos de equipo
- Si se busca implementar soluciones alternativas de energía como la solar, es importante tener en cuenta que no exista una alta nubosidad en la zona donde se instala el equipo. En caso de que exista pocas horas de radiación efectiva, se recomienda complementar la energía solar con otro sistema de energía como el uso de baterías o la corriente directa
- El uso de dispositivos como el ESP32 están adaptados para consumir menos energía que el Arduino y se pueden programar en modo “*sleep*” para para reducir el consumo del microcontrolador

### 3) Transmisión de datos

- La transmisión de datos es un campo que actualmente ha sido más estudiado. La red wifi o bluetooth puede ser eficiente cuando se requiere transmitir datos a una distancia corta (< 10 m) y donde no se requiere mucha velocidad en la transmisión de datos. Sin embargo, protocolos de los que se habla en la actualidad como el 5G, NB-IoT o el Lora pueden transmitir datos a mayor distancia; siendo el Lora el más popular debido a que es el más económico y puede transmitir datos a mayor velocidad (Camarena., 2022).

### 4) Biopelículas en sensores

- En cuanto a las biopelículas generadas en los equipos es importante que estos cuenten como protección IP69, muy común en los multiparámetros como el que se usó para comparar datos en la presente investigación. Sin embargo, esta protección no evita la generación de biopelículas cuando los sensores se sumergen durante varias semanas. Es importante, hacer mayores investigaciones en cuanto a la resistencia del material de los sensores, frecuencia de limpieza y mantenimiento para evitar la formación de biopelículas y que esto pueda alterar la medida tomada por el sensor.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

- Se configura un equipo *Smart Sensor* (SS) y un equipo *Smart Sensor* IoT (SS-IoT) para monitoreo puntual y continuo, respectivamente para los sensores de calidad del agua de pH, temperatura y conductividad de la marca DFRobot. Los análisis de laboratorio mostraron que el SS funciona con una precisión y una exactitud similar al de un multiparámetro comercial con una inversión del 20% con respecto al costo del multiparámetro. Para el caso del SS-IoT aún se presentan retos en su implementación, siendo la transmisión de datos el reto más grande por atender.
- El equipo SS en condiciones de campo muestra valores de medición muy cercanos al MP para los parámetros de pH y temperatura. Sin embargo, para el caso de la EC hay mayores interferencias para este parámetro que se traducen en una menor exactitud. A nivel de laboratorio se comprueba que frente a soluciones estándar de conductividad que el SS mide lo esperado y que las diferencias encontradas con el MP en campo pueden estar influenciadas por la incertidumbre que manejan tanto el MP como el SS y no porque el equipo SS pierda capacidad de medición. Se concluye entonces, que el SS tiene al menos la misma precisión y exactitud que el MP para el parámetro de pH y una mejor exactitud y precisión para el caso de la EC. Los datos tomados por el SS para EC presentan la misma confiabilidad que los del MP en el rango de medición de 0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- En cuanto al monitoreo continuo se identificaron muchas áreas que aún requieren investigación. El SS-IoT podría estar sobreestimando ligeramente el valor del pH y significativamente el valor de EC. La temperatura reporta el ciclo diurno y nocturno y el sensor de nivel presenta mucho ruido para un mismo nivel. La falla más común presentada durante el monitoreo fue por la transmisión de los datos al usar la red wifi. Este error eliminó hasta el 80% de los datos semanales en algunos meses por la inestabilidad de la señal. Se requiere mayor investigación en cómo se puede transmitir los datos de manera más eficiente.

- Igualmente, en el monitoreo continuo se presentaron fallas en el sensor de conductividad y temperatura que se dieron por temas de cableado, pero también posiblemente porque se generaron biopelículas en los sensores que alteran la medida de la conductividad. En el mes de octubre de 2023 se observaron incrementos de hasta el 300% del dato leído al inicio del mes por el sensor de conductividad, lo cual se podría atribuir por ahora a esta biopelícula. Se requiere investigar la frecuencia con la cual se debe hacer una limpieza y mantenimiento de los sensores en monitoreo continuo teniendo en cuenta que se encuentra sumergidos de manera continua y son más propensos al fallar por factores externos.
- Las versiones SS y SS-IoT trabajadas en la presente tesis de investigación muestran diferentes ventajas en su uso como el costo y la confiabilidad en precisión y exactitud de los datos frente a el uso de un multiparámetro comercial. Sin embargo, se recomienda que estas versiones sean utilizadas en proyectos donde no se requiere mucha exactitud, pero la precisión sea más importante. El SS para medición puntual puede ser de utilidad para llevar a campo en donde no se tenga acceso a un multiparámetro y que se requiera recopilar información rápida de calidad de agua. El equipo SS-IoT para monitoreo continuo se puede utilizar para aplicaciones en donde se requiera medir en tiempo real pero no se cuenta con el presupuesto o la logística para tomar datos continuos. El equipo SS-IoT puede brindar la información mínima necesaria para evaluar una estructura SUDS ante un evento de lluvia y por periodos largos de monitoreo.
- En caso de que se busque implementar el equipo SS o el SS-IoT a una estructura SUDS para evaluar su desempeño se requiere tener en cuenta recomendaciones como cercanías a un punto de energía, cobertura de conexión wifi para la transmisión de datos (u otro protocolo de comunicación de datos) y fácil accesibilidad para el mantenimiento de los equipos. Se recomienda que los sensores sean instalados a la entrada y a la salida de la estructura para evaluar los cambios de los parámetros en cada caso.
- El trabajo a futuro de esta investigación se debe enfocar a generar un prototipo compacto con el cual se puedan tomar datos en diferentes cuerpos de agua para el caso del SS y por periodos de tiempo prolongados para el caso del SS-IoT con el fin de determinar su resistividad, frecuencia de mantenimiento, frecuencia con la

que se deben cambiar las sondas de los sensores de bajo costo, etc. Se deben encontrar alternativas para el tema de transmisión de datos que no dependan de internet para que no se pierda la información y se puedan evaluar los datos obtenidos por los sensores.

- Esta investigación sirvió como base para generar recomendaciones en el uso de sensores de bajo costo con un alto nivel de rigor científico, generando una contribución significativa en el uso de equipos de bajo costo para el monitoreo puntual y continuo de la escorrentía superficial in-situ que puede profundizarse en un trabajo doctoral. Se espera que el trabajo a futuro se enfoque en robustecer el sensor para ser utilizado en otras áreas que requieran el monitoreo del recurso agua con una buena precisión y exactitud.

## A. Anexo A: Código de programación para muestreo puntual *Smart Sensor*

```

#include <OneWire.h>
#include "DFRobot_PH.h"
#include "DFRobot_EC.h"
#include <EEPROM.h>

#define PH_PIN A1
#define EC_PIN A3
int DS18S20_Pin = 7; //DS18S20 Signal pin on digital 7
float voltagePH,voltageEC,phValue,ecValue; //temperature = 25;
DFRobot_PH ph;
DFRobot_EC ec;
OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 7

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  ph.begin();
  ec.begin();
}

void loop()
{
  float temperature = getTemp();
  char cmd[10];
  static unsigned long timepoint = millis();
  if(millis()-timepoint>1000U){ //time interval: 1s
    timepoint = millis();
    //temperature = readTemperature(); // read your temperature sensor to
execute temperature compensation
    voltagePH = analogRead(PH_PIN)/1024.0*5000; // read the ph voltage
    phValue = ph.readPH(voltagePH,temperature); // convert voltage to pH with
temperature compensation
    Serial.print("pH:");

```

```

    Serial.print(phValue,2);
    voltageEC = analogRead(EC_PIN)/1024.0*5000;
    ecValue   = ec.readEC(voltageEC,temperature);    // convert voltage to EC with
temperature compensation
    Serial.print(", EC:");
    Serial.print(ecValue,2);
    Serial.print("ms/cm");
    Serial.print(", Temp:");
    Serial.print(temperature);
    Serial.println("°C");
}
if(readSerial(cmd)){
    strupr(cmd);
    if(strstr(cmd,"PH")){
        ph.calibration(voltagePH,temperature,cmd);    //PH calibration process by Serail
CMD
    }
    if(strstr(cmd,"EC")){
        ec.calibration(voltageEC,temperature,cmd);    //EC calibration process by Serail
CMD
    }
}
}

int i = 0;
bool readSerial(char result[]){
    while(Serial.available() > 0){
        char inChar = Serial.read();
        if(inChar == '\n'){
            result[i] = '\0';
            Serial.flush();
            i=0;
            return true;
        }
        if(inChar != '\r'){
            result[i] = inChar;
            i++;
        }
        delay(1);
    }
    return false;
}

float getTemp()
{
    //returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius

    byte data[12];
    byte addr[8];

```

```
if ( !ds.search(addr)) {
  //no more sensors on chain, reset search
  ds.reset_search();
  return -1000;
}

if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
  Serial.println("CRC is not valid!");
  return -1000;
}

if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
  Serial.print("Device is not recognized");
  return -1000;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44,1); // start conversion, with parasite power on at the end

byte present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
  data[i] = ds.read();
}
ds.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
float TemperatureSum = (tempRead / 16)+0.5;

return TemperatureSum;
}
```

## B. Anexo B: Datos tomados en laboratorio

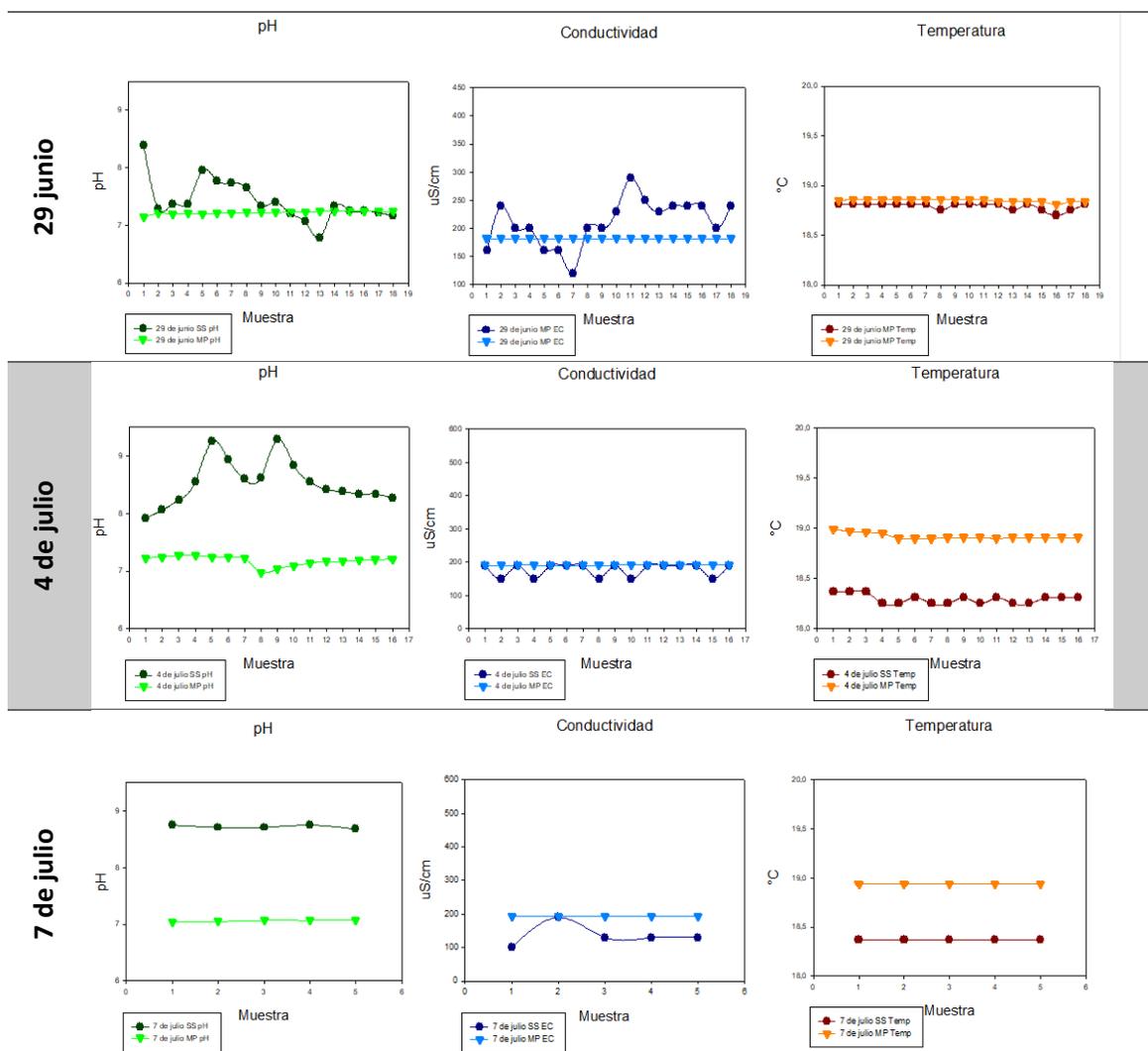
- Datos del escenario 1

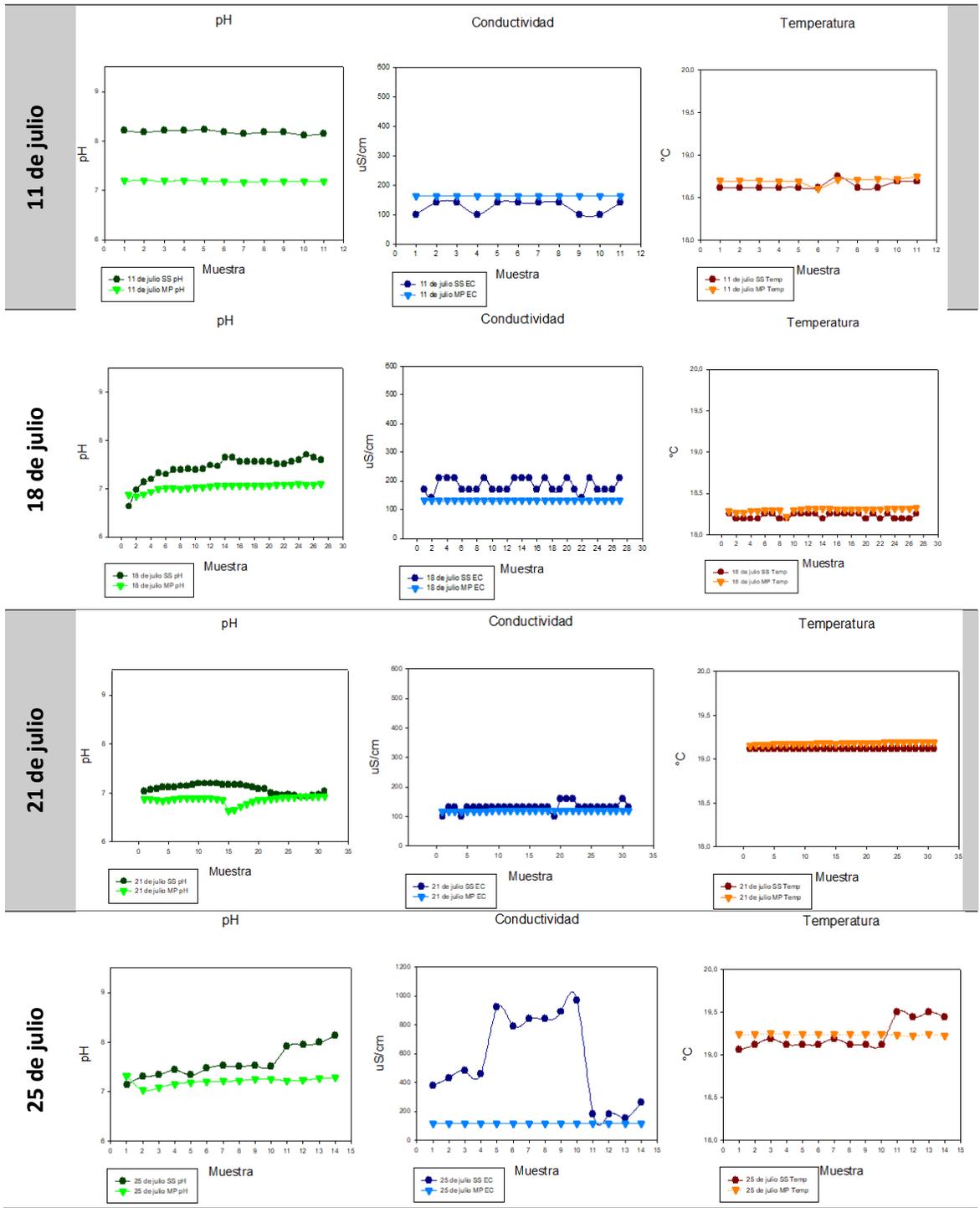
		OBJETIVO 1															
Condición	Tiempo	pH 4				pH 7				pH 10				EC 1413			
		SS		MP		SS		MP		SS		MP		SS		MP	
		SS	Temp	MP	Temp	SS	Temp	MP	Temp	SS	Temp	MP	Temp	SS	Temp	MP	Temp
Escenario 1	0 min	4.09	21.44	4.01	21.53	7.09	22.25	7.2	22.22	10	22.5	10.04	23.09	1480	22.44	1360	22.99
	2 min	4.03	21.34	3.97	21.83	7.09	22.06	7.06	22.04	10	22.19	10.11	22.75	1480	22.37	1359	22.71
	4 min	4	21.54	3.96	21.9	7.09	22.06	7.04	22.04	9.79	22.5	10.12	22.46	1470	22.69	1263	23.52
	6 min	4	21.69	3.96	21.85	7.12	21.94	7.04	2.98	9.97	22.31	10.12	22.48	1500	22.94	1276	23.35
	8 min	4	22.19	3.96	21.84	7.09	21.81	7.04	21.88	10	22.37	10.13	22.88	1470	22.87	1411	21.3
	10 min	4	22.31	3.96	21.83	7.12	21.81	7.03	21.92	10	22.19	10.13	22.5	1470	22.87	1387	23.32
	12 min	4	22	3.97	22.02	7.09	21.81	7.04	21.85	9.91	22.06	10.12	22.74	1500	23	1393	23.38
	14 min	3.97	22.06	3.95	22.06	7.12	21.81	7.03	21.97	9.79	22.31	10.13	22.6	1480	22.1	1229	22.5
	16 min	3.97	22.44	3.96	22.42	7.09	21.75	7.04	22.04	9.79	22.19	10.12	22.69	1490	23.5	1346	24.11
	18 min	4	22.62	3.96	22.39	7.06	21.87	7.03	22.52	9.79	22.44	10.12	22.72	1560	23.5	1356	23.64
	20 min	3.97	22.56	3.95	22.46	7.12	22	7.03	22.56	9.79	22.25	10.13	22.76	1480	23.62	1365	23.86
	Prome	4.00	22.02	3.96	22.01	7.10	21.92	7.05	20.37	9.89	22.30	10.12	22.70	1489.09	22.90	1340.45	23.15
	Dsv. Esta	0.03	0.46	0.02	0.30	0.02	0.15	0.05	5.77	0.10	0.14	0.03	0.19	25.87	0.49	58.38	0.77
	Escenario 1	0 min	4.03	20.62	4.05	20.84	7	21.62	7.1	21.25	9.86	21.75	10.08	21.53	1420	21.31	1357
2 min		4.03	20.81	4.03	20.73	7	21.69	7.03	21.37	9.88	21.62	10.11	21.53	1440	21.37	1356	21.9
4 min		4	21.12	4.02	20.88	7	21.62	7.03	21.38	9.86	21.69	10.11	21.61	1440	21.56	1375	21.94
6 min		4	21.19	4.02	20.82	6.97	21.75	7.02	21.54	9.86	21.87	10.12	21.57	1440	21.56	1355	22.01
8 min		4	21.19	4.02	20.95	6.97	21.81	7.02	21.61	9.88	21.75	10.12	21.72	1470	21.56	1365	22.12
10 min		4	21.25	4.01	21.04	7	21.81	7.01	21.6	9.86	21.75	10.12	21.88	1440	21.56	1355	22.15
12 min		4	21.44	4.02	21.15	6.97	21.81	7.01	21.67	9.86	21.94	10.12	21.84	1430	21.69	1363	22.21
14 min		4	21.44	4.01	21.15	7	21.81	7.01	21.73	9.86	22	10.12	21.74	1430	21.75	1338	20.9
16 min		4.03	21.44	4.01	21.14	7	21.75	7.01	21.7	9.83	22.12	10.12	21.52	1430	20.56	1325	21.02
18 min		4.03	21.56	4.01	21.19	7	21.75	7.01	21.7	9.86	21.81	10.12	21.7	1470	20.62	1336	21.05
20 min		4	21.5	4.01	21.16	7	21.56	7.01	21.67	9.86	21.75	10.12	21.68	1460	20.69	1303	21.12
Prome		4.01	21.23	4.02	21.00	6.99	21.73	7.02	21.57	9.86	21.82	10.11	21.67	1442.73	21.29	1348.00	21.65
Dsv. Esta		0.02	0.30	0.01	0.17	0.01	0.09	0.03	0.16	0.01	0.15	0.01	0.13	16.79	0.45	20.70	0.52
Escenario 1		0 min	4	21.56	4.04	21.47	7	21	7.11	21.24	9.91	21.12	10.06	21.41	1410	22.06	1370
	2 min	4	21.5	4.04	21.52	7.03	21.25	7.03	21.46	9.91	21.12	10.08	21.28	1460	21.75	1358	21.55
	4 min	4	21.69	4.03	21.57	7.03	21.12	7.02	21.54	9.91	21.19	10.08	21.37	1440	21.81	1323	21.6
	6 min	4.03	21.75	4.03	21.75	7.03	21.37	7.01	21.74	9.91	21.31	10.09	21.34	1450	21.94	1364	21.62
	8 min	4	21.69	4.02	21.71	7.03	21.94	7.01	21.9	9.88	21.25	10.09	21.33	1380	21.81	1385	21.63
	10 min	4.03	21.56	4.02	21.63	7.03	22	7.01	21.9	9.88	21.37	10.09	21.41	1420	21.94	1388	21.67
	12 min	4.03	21.81	4.02	21.83	7.03	22.06	7.01	21.86	9.88	21.5	10.09	21.47	1420	21.81	1391	21.7
	14 min	4	21.81	4.02	21.89	7.03	21.87	7.01	21.93	9.88	21.62	10.09	21.53	1410	22	1318	21.72
	16 min	4.03	21.69	4.01	21.82	7	21.87	7.01	21.8	9.88	21.56	10.09	21.79	1410	22.06	1319	21.73
	18 min	4	21.56	4.02	21.9	7.03	21.62	7.01	21.68	9.88	22.06	10.08	22.06	1480	22.12	1336	21.75
	20 min	4.03	21.81	4.01	21.82	7.03	21.62	7.01	21.69	9.85	21.94	10.08	22.05	1480	22.25	1393	21.76
	Prome	4.01	21.68	4.02	21.72	7.02	21.61	7.02	21.70	9.89	21.46	10.08	21.56	1432.73	21.96	1358.64	21.66
	Dsv. Esta	0.02	0.11	0.01	0.15	0.01	0.37	0.03	0.22	2.98	0.32	0.01	6.51	31.97	0.16	29.91	0.08

• Datos del escenario 2

Condición	Tiempo	pH 4				pH 7				pH 10				EC 1413			
		SS	Temp	MP	Temp	SS	Temp	MP	Temp	SS	Temp	MP	Temp	SS	Temp	MP	Temp
Escenario 2	0 min	4	23.31	3.92	23.12	7.09	23	7.17	23.12	10	23.31	10.09	23.32	1380	23.12	1365	23.53
	2 min	4	23.37	3.96	23.03	7.09	22.94	7.08	22.85	10.06	23.06	10.11	23.14	1410	23.19	1356	23.72
	4 min	4	23.19	3.96	23.27	7.09	22.69	7.05	22.81	10.06	22.81	10.11	23.14	1440	23.19	1278	23.65
	6 min	3.97	23	3.95	23.01	7.09	22.75	7.05	22.72	10.06	22.87	10.12	23.02	1410	23.31	1320	23.74
	8 min	4	22.94	3.95	22.9	7.09	22.75	7.04	22.71	10.06	22.81	10.11	23.11	1370	23.25	1281	23.73
	10 min	4	23.19	3.95	22.95	7.09	22.69	7.04	22.65	10.06	22.75	10.12	22.93	1370	23.31	1321	23.88
	12 min	3.97	23	3.95	22.9	7.09	22.62	7.04	22.63	10.06	22.62	10.12	22.85	1400	23.37	1377	23.73
	14 min	3.97	22.81	3.95	22.87	7.09	22.31	7.03	22.54	10.06	22.62	10.12	22.86	1440	23.5	1385	24
	16 min	3.97	22.81	3.95	22.79	7.09	22.31	7.03	22.57	10.06	22.75	10.12	22.84	1470	23.56	1380	23.6
	18 min	3.97	22.87	3.95	22.73	7.09	22.31	7.03	22.62	10.06	22.62	10.12	22.92	1400	23.44	1381	23.22
	20 min	3.97	23	3.94	22.83	7.09	22.37	7.04	22.61	10.06	22.94	10.12	22.97	1440	23.44	1311	23.81
	Prome	3.98	23.04	3.95	22.95	7.09	22.61	7.05	22.71	10.05	22.83	10.11	23.01	1411.82	23.33	1341.36	23.66
	Dsv. Esta	0.02	0.19	0.01	0.16	0.00	0.25	0.04	0.17	0.02	0.21	0.01	0.15	32.50	0.14	40.57	0.18
	Escenario 2	0 min	4	21.25	4.09	21.64	6.97	20.94	7.03	21.25	9.77	20.27	10.05	21.19	1410	21.75	1360
2 min		4	21.31	4.05	21.65	6.97	21.25	7.02	21.39	9.77	21.19	10.09	21.09	1410	20.87	1362	21.21
4 min		4	21.5	4.03	21.62	6.97	21.31	7.03	21.4	9.77	21.19	10.09	21.29	1410	20.81	1400	20.6
6 min		4	21.31	4.03	21.6	6.97	21.25	7.02	21.42	9.77	21.31	10.09	21.28	1430	21.19	1393	20.92
8 min		4.03	21.25	4.03	21.7	6.97	21.25	7.02	21.46	9.77	21.25	10.09	21.45	1430	21.19	1348	21.44
10 min		4	21.25	4.03	21.59	6.97	21.31	7.01	21.47	9.77	21.25	10.09	21.58	1430	21.31	1373	21.44
12 min		4.03	21.25	4.03	21.44	6.97	21.44	7.01	21.62	9.77	21.31	10.09	21.52	1470	21.5	1349	21.47
14 min		4.03	21.31	4.02	21.36	6.97	21.44	7.01	21.66	9.77	21.5	10.09	21.59	1470	21.62	1381	21.58
16 min		4.03	21.31	4.03	21.39	6.97	21.5	7.01	21.61	9.74	21.5	10.09	21.64	1470	21.44	1384	21.58
18 min		4	21.44	4.03	21.5	6.97	21.44	7.01	21.63	9.74	21.62	10.09	21.75	1460	21.87	1357	21.83
20 min		4	21.5	4.02	21.56	6.97	21.5	7.01	21.71	9.77	21.87	10.09	21.91	1460	21.87	1372	21.8
Prome		4.01	21.33	4.04	21.55	6.97	21.33	7.02	21.51	9.76	21.30	10.09	21.48	1440.91	21.40	1370.82	21.40
Dsv. Esta		0.02	0.10	0.02	0.11	0.00	0.16	0.01	0.14	0.01	0.40	0.01	0.25	25.48	0.37	17.35	0.37
Escenario 2		0 min	4	22.19	4.03	22.11	6.97	21.5	7.18	21.75	9.8	22.5	10.01	22.66	1480	21.19	1387
	2 min	4	22.5	4.03	22.24	6.97	21.69	7.04	21.93	9.83	22.25	10.03	22.37	1420	21.44	1392	21.47
	4 min	4	22.62	4.02	22.34	6.97	21.59	7.02	22.09	9.83	22.12	10.05	22.28	1430	21.19	1395	21.46
	6 min	4	22.5	4.02	22.36	6.97	21.89	7.01	22.11	9.83	22	10.04	22.31	1460	21.19	1394	21.48
	8 min	4	22.5	4.02	22.42	6.94	21.81	7.01	22	9.83	21.94	10.05	22.14	1400	22.06	1373	22.37
	10 min	4	22.37	4.02	22.4	6.91	21.94	7.02	21.93	9.83	21.81	10.05	22.14	1400	22	1320	22.18
	12 min	4	22.37	4.01	22.58	6.94	21.55	7.01	21.79	9.83	21.87	10.05	21.97	1430	21.94	1403	22.69
	14 min	4	22.5	4.01	22.55	6.97	21.75	7.01	21.73	9.83	21.87	10.05	21.91	1400	22.12	1406	22.43
	16 min	4	22.44	4.01	22.46	6.97	22	7.02	21.82	9.83	21.75	10.06	22	1430	22.06	1411	22.4
	18 min	4	22.31	4.01	22.47	6.97	21.81	7	21.82	9.83	21.81	10.06	21.98	1460	22.06	1414	22.37
	20 min	4	22.37	4.01	22.48	7	21.81	7.01	21.78	9.83	21.69	10.06	21.88	1400	22.06	1414	22.28
	Prome	4.00	22.42	4.02	22.40	6.96	21.76	7.03	21.89	9.83	21.96	10.05	22.15	1428.18	21.76	1391.73	22.06
	Dsv. Esta	0.00	0.12	0.01	0.14	0.02	0.16	0.05	0.13	0.01	0.24	0.02	0.24	28.22	0.41	26.89	0.47

## C. Anexo C: Datos tomados en la campaña de monitoreo en campo con el SS y el MP





## D. Anexo D: Código de programación para muestreo continuo *Smart Sensor*

```
#include "Arduino.h"
#include "Adafruit_ADS1015.h"
#include "DFRobot_ESP_PH_WITH_ADC.h"
#include "EEPROM.h"
#include "OneWire.h"
#include "DallasTemperature.h"
#include "DFRobot_ESP_EC.h"

#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

#define ONE_WIRE_BUS 27
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

DFRobot_ESP_PH_WITH_ADC ph;

#define ESPADC 4096.0 //the esp Analog Digital Conversion value
#define ESPVOLTAGE 3300 //the esp voltage supply value
float voltage, voltage2, ecValue, pHValue, temperature = 25;

#define Trigger 18
#define Echo 19

const char* ssid = "5G";
const char* password = "12345678";

DFRobot_ESP_EC ec;
Adafruit_ADS1115 ads;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  pinMode(Trigger, OUTPUT); //pin como salida
  pinMode(Echo, INPUT); //pin como entrada
  digitalWrite(Trigger, LOW); //Inicializamos el pin con 0

  EEPROM.begin(32); //needed to permit storage of calibration value in eeprom
  ph.begin();
  ec.begin();
```

---

```

ads.setGain(GAIN_ONE);
ads.begin();

delay(4000); //Delay needed before calling the WiFi.begin

WiFi.begin(ssid, password);

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { //Check for the connection
  delay(1000);
  Serial.println("Connecting to WiFi...");
}

Serial.println("Connected to the WiFi network");
}

void loop()
{
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) { //Check WiFi connection status
    static unsigned long timepoint = millis();
    if (millis() - timepoint > 1000U) //time interval: 1s
    {
      timepoint = millis();
      //voltage = rawPinValue / esp32ADC * esp32Vin
      //voltage2 = analogRead(PH_PIN) / ESPADC * ESPVOLTAGE; // read the voltage for
PH
      //voltage2 = analogRead(EC_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage for EC

      voltage = ads.readADC_SingleEnded(3) / 10;
      Serial.print("voltagePH:");
      Serial.println(voltage, 4);

      temperature = readTemperature(); // read your temperature sensor to execute
temperature compensation
      Serial.print("temperature:");
      Serial.print(temperature, 1);
      Serial.println("^C");

      pHValue = ph.readPH(voltage, temperature); // convert voltage to pH with temperature
compensation
      Serial.print("pH:");
      Serial.println(pHValue, 4);
    }
    ph.calibration(voltage, temperature); // calibration process by Serail CMD

    delay(1400);

    if (millis() - timepoint > 1000U) //time interval: 1s
    {
      timepoint = millis();
    }
  }
}

```

---

```

    //voltage = rawPinValue / esp32ADC * esp32Vin
    //voltage2 = analogRead(PH_PIN) / ESPADC * ESPVOLTAGE; // read the voltage for
PH
    //voltage2 = analogRead(EC_PIN)/1024.0*5000; // read the voltage for EC

    voltage = ads.readADC_SingleEnded(1) / 10;
    Serial.print("voltageEC:");
    Serial.println(voltage, 4);

    ecValue = ec.readEC(voltage, temperature); // convert voltage to EC with
temperature compensation
    Serial.print("^C EC:");
    Serial.print(ecValue,4);
    Serial.println("ms/cm");
}
ec.calibration(voltage, temperature); // calibration process by Serail CMD

String SphValue = String (phValue);
String Stemperature = String (temperature);
String SecValue = String (ecValue);

float t; //timepo que demora en llegar el eco
float d; //distancia en centimetros

digitalWrite(Triigger, HIGH);
delayMicroseconds(10); //Enviamos un pulso de 10us
digitalWrite(Triigger, LOW);

t = pulseIn(Echo, HIGH); //obtenemos el ancho del pulso
d = t/59; //escalamos el tiempo a una distancia en cm

Serial.print("Distancia sensor 1: ");
Serial.print(d); //Enviamos serialmente el valor de la distancia
Serial.print("cm");
Serial.println();

String Snivel = String (d);

HTTPClient http;

http.begin("https://sensores.up.railway.app/api/waterresources/add"); //Specify
destination for HTTP request
http.addHeader("Content-Type", "application/json"); //Specify content-type
header

```

```

//char json[] =
"{\"name\": \"rio_Tabio\", \"valoracion\": { \"pH\": 18, \"conductivity\": 500, \"temperature\": 19, \"turbidity\": 4, \"depth\": 37 }, \"coordenadas\": { \"latitud\": 5.943323, \"longitud\": -73.4354332 } }";

//{\"name\": 'rio_Tobia', 'valoracion': { 'pH': 9.74, 'conductivity': 504, 'temperature': 17.34, 'turbidity': 5, 'depth': 11 }, 'coordenadas': { 'latitud': 5.943323, 'longitud': -73.4354332 } }";

//{\"name\": \"rio_Tabio\", \"valoracion\": { \"pH\": 18, \"conductivity\": 500, \"temperature\": 19, \"turbidity\": 4, \"depth\": 37 }, \"coordenadas\": { \"latitud\": 5.943323, \"longitud\": -73.4354332 } }";
int httpResponseCode = http.POST("{\"name\": \"Tanque IEI\", \"valoracion\": { \"pH\": \"+SphValue+\", \"conductivity\": \"+SecValue+\", \"temperature\": \"+S temperature+\", \"turbidity\": 7, \"depth\": \"+Snivel+\" }, \"coordenadas\": { \"latitud\": 7.743323, \"longitud\": -70.4354332 } }"); //Send the actual POST request

if (httpResponseCode > 0) {

    String response = http.getString(); //Get the response to the request

    Serial.println(httpResponseCode); //Print return code
    Serial.println(response); //Print request answer

} else {

    Serial.print("Error on sending POST: ");
    Serial.println(httpResponseCode);

}

http.end(); //Free resources

} else {

    Serial.println("Error in WiFi connection");

}

//delay(600000);
delay(30000);
delay(30000);

delay(30000);
delay(30000);

delay(30000);
delay(30000);

delay(30000);
delay(30000);

```

```
delay(30000);
delay(30000);

/*delay(120000);
delay(60000);
delay(120000);

delay(120000);
delay(60000);
delay(120000);*/

//delay(7000);
}

float readTemperature()
{
  sensors.requestTemperatures();
  return sensors.getTempCByIndex(0);
}
```

## Bibliografía

- Abbas, O., Abou Rjeily, Y., Sadek, M., & Shahrour, I. (2017). A large-scale experimentation of the smart sewage system. *Water and Environment Journal*, 31(4), 515–521. <https://doi.org/10.1111/WEJ.12273>
- Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. *Sensors 2020*, Vol. 20, Page 363, 20(2), 363. <https://doi.org/10.3390/S20020363>
- Agade, P., & Bean, E. (2023). GatorByte-An Internet of Things-Based Low-Cost, Compact, and Real-Time Water Resource Monitoring Buoy Specifications table. *HardwareX*, 14, e00427. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00427>
- AgriMetSoft. (2019). *Root Mean Square Error Calculator*. <https://agrimetsoft.com/calculators/Root%20Mean%20Square%20Error#>
- Ahmed, U., Mumtaz, R., Anwar, H., Mumtaz, S., & Qamar, A. M. (2020). Water quality monitoring: from conventional to emerging technologies. *Water Supply*, 20(1), 28–45. <https://doi.org/10.2166/WS.2019.144>
- Ali, A. N. A., Khan, M. Y. M. A., Bolong, N., Maarof, K. A., & Tanalol, S. H. (2020, September 26). conceptual and design framework for smart stormwater filtration. IEEE international conference on artificial intelligence in engineering and technology, iicaiet 2020. <https://doi.org/10.1109/iicaiet49801.2020.9257828>
- Almetwally, S. A. H., Hassan, M. K., & Mourad, M. H. (2020). Real Time Internet of Things (IoT) Based Water Quality Management System. *Procedia CIRP*, 91, 478–485. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.03.107>
- American Public Health Association (APHA). (2005). *Standard method for examination of water and wastewater*. <https://www.standardmethods.org/>
- Arévalo Junco, A. D. (2019). Prototipo de un sistema de monitoreo de calidad del agua subterránea en instalaciones de captación de una localidad rural del municipio de Tibaná – Boyacá
- Assendelft, R. S., & Iija van Meerveld, H. J. (2019). a low-cost, multi-sensor system to monitor temporary stream dynamics in mountainous headwater catchments. *sensors (switzerland)*, 19(21). <https://doi.org/10.3390/s19214645>

- Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, 46(20), 6787–6798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>
- Bartos, M., Wong, B., & Kerkez, B. (2018). Open storm: a complete framework for sensing and control of urban watersheds. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(3), 346–358. <https://doi.org/10.1039/C7EW00374A>
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Camarena Gamarra, P. A. (2022). Desarrollo de una red LoRaWAN® para IoT
- Castro, J. (2012). *Validación parámetros de pH y conductividad en aguas superficiales y residuales domesticas en el laboratorio de ambiental de la CRC bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025*. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/7307/Validaci%C3%B3n%20par%C3%A1metros%20de%20pH%20y%20conductividad%20en%20aguas%20superficiales%20y%20residuales%20domesticas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chen, T., Wang, M., Su, J., Ikram, R. M. A., & Li, J. (2023). Application of Internet of Things (IoT) Technologies in Green Stormwater Infrastructure (GSI): A Bibliometric Review. *Sustainability*, 15(18), 13317. <https://doi.org/10.3390/su151813317>
- Delgado, A., Briciu-Burghina, C., & Regan, F. (2021). Antifouling Strategies for Sensors Used in Water Monitoring: Review and Future Perspectives. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 389*, 21(2), 389. <https://doi.org/10.3390/S21020389>
- DFRobot. (2023). *Liquid Sensor*. <https://www.dfrobot.com/category-68.html>
- Fell, J., Pead, J., & Winter, K. (2019). *low-cost flow sensors: making smart water monitoring technology affordable*. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 8(1), 72–77. <https://doi.org/10.1109/MCE.2018.2867984>
- FL0 - backend engineering, supercharged. (n.d.). Retrieved January 28, 2024, from <https://www.fl0.com/>
- Giraldo, M., Jiménez Ariza, S., Martínez, J., Ramírez, P., Rodríguez Sánchez, J., Camacho-Botero, L., & Diazgranados, M. (2019). (PDF) *Quantifying the performance of a SUDS treatment train. A case-study of San Cristobal Park, Bogotá (Colombia)*. [https://www.researchgate.net/publication/336767584\\_Quantifying\\_the\\_performance\\_of\\_a\\_SUDS\\_treatment\\_train\\_A\\_case-study\\_of\\_San\\_Cristobal\\_Park\\_Bogota\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/336767584_Quantifying_the_performance_of_a_SUDS_treatment_train_A_case-study_of_San_Cristobal_Park_Bogota_Colombia)

- HANNA. (2023). *HI 9829 Medidor Multiparámetro Impermeable para pH / ISE / CE / OD / Turbidez con Opción de GPS | HANNA Instruments Colombia*. HANNA. <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-9829-medidor-multiparametro-impermeable-para-ph-ise-ce-od-turbidez-con-opcion-de-gps>
- Hanna. (2023). *HI 9829 Medidor Multiparámetro Impermeable para pH / ISE / CE / OD / Turbidez con Opción de GPS | HANNA Instruments Colombia*. <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-9829-medidor-multiparametro-impermeable-para-ph-ise-ce-od-turbidez-con-opcion-de-gps>
- Ideam, & Invemar. (2021). Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua. In *Ideam, Invemar*.
- Lakshmikantha, V., Hiriyannagowda, A., Manjunath, A., Patted, A., Basavaiah, J., & Anthony, A. A. (2021). IoT based smart water quality monitoring system. *Global Transitions Proceedings*, 2, 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.gltip.2021.08.062>
- Lambrou, T. P., Anastasiou, C. C., Panayiotou, C. G., & Polycarpou, M. M. (2014). a low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2765–2772. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2316414>
- Linjama, J., Puustinen, M., Koskiahho, J., Sirkka, T., Kotilainen, H., & Granlund, K. (2009). implementation of automatic sensors for continuous monitoring of runoff quantity and quality in small catchments. *Agricultural and Food Science*, 18(3–4), 417–427. <https://doi.org/10.23986/afsci.5957>
- Liu, Y., Weerts, A. H., Clark, M., Hendricks Franssen, H. J., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D. J., Schwanenberg, D., Smith, P., Van Dijk, A. I. J. M., Van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S. J., Rakovec, O., & Restrepo, P. (2012). advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(10), 3863–3887. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3863-2012>
- Malek, K., Ortíz Rodríguez, E., Lee, Y.-C., Murillo, J., Mohammadkhorasani, A., Vigil, L., Zhang, S., & Moreu, F. (2023). Design and implementation of sustainable solar energy harvesting for low-cost remote sensors equipped with real-time monitoring systems. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3), 100051. <https://doi.org/10.1016/J.IINTEL.2023.100051>
- Mancipe, N., Beltrán, D., Sandoval, J., Riaño, M. F., Rodríguez, E., Castañeda, P., & Alarcón, E. (2022). *Evaluación del impacto hidrológico y ambiental de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), caso de estudio en el campus de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá*.

- Montenegro, A. (2016). Desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del agua utilizando sensores capacitivos de bajo costo (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana,
- Murphy, K., Heery, B., Sullivan, T., Zhang, D., Paludetti, L., Lau, K. T., Diamond, D., Costa, E., O'Connor, N., & Regan, F. (2015). a low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. *Talanta*, 132, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.09.045>
- O'Flynn, B., Martínez-Català, R., Harte, S., O'Mathuna, C., Geary, J., Slater, C., Regan, F., Diamond, D., & Murphy, H. (2007). SmartCoast: A Wireless Sensor Network for water quality monitoring. *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN*, 815–816. <https://doi.org/10.1109/LCN.2007.151>
- Parra, L., Rocher, J., Escrivá, J., & Lloret, J. (2018). design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms. *Aquacultural Engineering*, 81, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.01.004>
- Poquita-Du, R. C., Morgia Du, I. P., & Todd, P. A. (2023). EmerSense: A low-cost multiparameter logger to monitor occurrence and duration of emersion events within intertidal zones. *HardwareX*, 14, e00410. <https://doi.org/10.1016/J.OHX.2023.E00410>
- Raja, L., Shanthi, G., & Periasamy, P. S. (2019). internet of things based real time water monitoring system. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 1368–1372. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2026.078219>
- Rasin, Z., & Rizal Abdullah, M. (2012). water quality monitoring system using zigbee based wireless sensor network grid-connected quasi-z-source photovoltaic inverter with energy storage view project water quality monitoring system using zigbee based wireless sensor network. <https://www.researchgate.net/publication/228785823>
- Rizzo, A., Bresciani, R., Martinuzzi, N., & Masi, F. (2020). Online monitoring of a long-term full-scale constructed wetland for the treatment of winery wastewater in Italy. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(2), 555. <https://doi.org/10.3390/app10020555>
- Salam, A. E. U., Sadjad, R. S. oed, Rezkullah, F. A. S., & Fakhri, M. (2019). online hydraulic parameter monitoring system in water distribution network. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 10(12), 1037–1045. <https://doi.org/10.24507/icicelb.10.12.1037>
- Salim, T. I., Haiyunnisa, T., & Alam, H. S. (2017). design and implementation of water quality monitoring for eel fish aquaculture. 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices, ISESD 2016, 208–213. <https://doi.org/10.1109/ISESD.2016.7886720>

SDA. (2020). *SISISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)*.

Seders, L. A., Shea, C. A., Lemmon, M. D., Maurice, P. A., & Talley, J. W. (2007). LakeNet: An Integrated Sensor Network for Environmental Sensing in Lakes. *Https://Home.Liebertpub.Com/Ees*, 24(2), 183–191. <https://doi.org/10.1089/EES.2006.0044>

Valle, L. (2017). *Sensor de nivel de agua con Arduino utilizando ultrasonidos*. <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-de-nivel-de-agua-con-arduino/>

Vijayakumar, N., & Ramya, R. (2015, July 15). the real time monitoring of water quality in iot environment. IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2015. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2015.7159459>

Zita, A. (2018). *Diferencia entre exactitud y precisión - Diferenciador*. <https://www.diferenciador.com/diferencia-entre-exactitud-y-precision/>