

# Sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua de riego en cultivos.

Maria José Clavijo Rodríguez

Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica extensión Tunja  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
Tunja, Boyacá - Colombia  
maria.clavijo01@uptc.edu.co

Jorge Andres Palacios Torres

Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica extensión Tunja  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
Tunja, Boyacá - Colombia  
Jorge.palacios@uptc.edu.co

**Resumen**—Este trabajo presenta el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua basado en sensores de bajo-medio costo, orientado a medir turbidez, TDS y temperatura en tiempo real mediante un microcontrolador ESP32 con transmisión IoT a través de ThingSpeak. El objetivo principal fue evaluar la precisión, estabilidad y viabilidad del sistema frente a instrumentos patrón y valores teóricos. Para ello se prepararon soluciones patrón de distintos niveles de turbidez y TDS, se registraron mediciones simultáneas con sensores y equipos de referencia, y se construyeron modelos de calibración polinomiales a partir de los datos obtenidos. Los resultados evidenciaron un desempeño adecuado del sensor de TDS, con errores relativos entre 6 % y 21 %, mientras que el sensor de turbidez mostró una variabilidad considerable, alcanzando errores entre 13 % y 77 % según la concentración evaluada. La medición de temperatura presentó una correspondencia estable, con un error aproximado del 4,7 % respecto al instrumento patrón. Las mediciones permitieron identificar que la respuesta de los sensores está influenciada por diversos factores ambientales, entre ellos la iluminación, la temperatura del líquido, la homogeneidad de las soluciones y la presencia de partículas en suspensión.

## I. INTRODUCCION

La calidad del agua utilizada en los sistemas de riego es un factor determinante para el rendimiento agrícola, el estado nutricional del suelo y la salud de los cultivos. Parámetros fisicoquímicos como la turbidez, la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y la temperatura influyen directamente en la disponibilidad de nutrientes, en los procesos de filtración y en la eficiencia de los sistemas de distribución. En condiciones de campo, estos parámetros pueden variar debido a fenómenos como arrastre de sedimentos, infiltración de contaminantes, degradación de fuentes hídricas o acumulación de sales, lo que hace necesario un monitoreo continuo y confiable para prevenir afectaciones en la productividad y para garantizar un uso adecuado del recurso. Sin embargo, la mayoría de los métodos convencionales empleados para esta tarea dependen de mediciones manuales, equipos de laboratorio de alto costo o procesos que no permiten seguimiento en tiempo real, limitando la capacidad de reacción ante cambios en la calidad del agua.

Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar sistemas accesibles y automatizados que permitan medir, registrar y analizar de manera inmediata los parámetros críticos del agua empleada en riego. En este contexto, el uso de sensores electrónicos, microcontroladores y plataformas IoT constituye una alternativa eficiente para implementar soluciones de bajo-medio costo capaces de operar de forma continua y remota. El presente trabajo propone un sistema de monitoreo basado en un microcontrolador ESP32, encargado de adquirir datos de turbidez, TDS y temperatura, registrarlos localmente y transmitirlos en tiempo real a una plataforma en la nube. Con ello, se busca demostrar la viabilidad técnica de este tipo de herramientas y su potencial para apoyar la toma de decisiones en entornos agrícolas y ambientales.

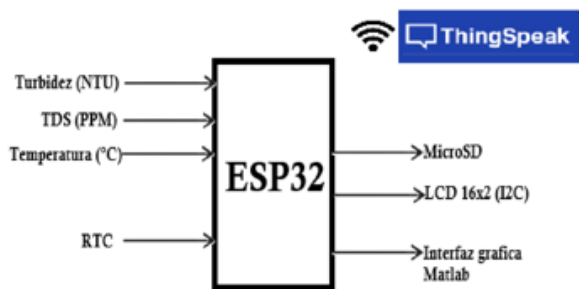
## II. DESARROLLO DE LA PRACTICA

### A. ESTRUCTURA GENERAL.

Para el desarrollo del sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua de riego en cultivos, el proyecto fue organizado en cuatro fases metodológicas. En la etapa inicial se empleó el microcontrolador ATmega328P para la adquisición básica de datos; no obstante, en la fase final se adoptó la placa de desarrollo ESP32, con el fin de integrar capacidades de conectividad WiFi y habilitar el envío automático de información hacia la plataforma ThingSpeak para su gestión en la nube.

El sistema contempló la medición de variables críticas para la evaluación de la calidad del agua, entre ellas la temperatura, el nivel de TDS (total de sólidos disueltos) y la turbidez. Asimismo, se incorporaron módulos auxiliares para garantizar un adecuado manejo de los datos, como un módulo de memoria microSD destinada al almacenamiento local, un reloj de tiempo real (RTC) para el registro preciso de fecha y hora, y una pantalla LCD con interfaz I2C que permitió la visualización inmediata de las lecturas durante el proceso de monitoreo. En la Fig. 1 se muestra el diagrama que detalla de manera más precisa las variables de entrada y salida consideradas en el sistema.

Fig. 1. Diagrama de bloques general sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua de riego en cultivos.

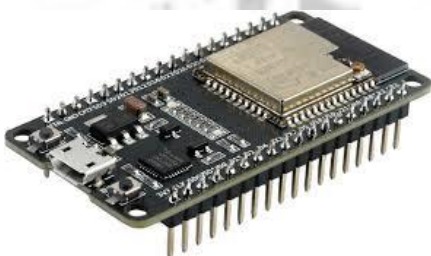


Como se observa en la Fig. 1, además de la implementación del registro de datos mediante el módulo microSD y la visualización de las variables medidas a través de una pantalla LCD, se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB destinada a la supervisión de los parámetros fisicoquímicos del agua. Esta interfaz también permite el registro automático de la información en un archivo Excel, facilitando su análisis y almacenamiento. El diseño y funcionamiento de dicha interfaz se describe con mayor detalle en la subsección *B.1 Interfaz gráfica y configuración Wifi*.

#### A.1 ESP32.

El microcontrolador ESP32, representado en la Fig. 2, actúa como el núcleo de procesamiento del sistema de monitoreo de la calidad del agua. Esta placa de desarrollo incorpora capacidades avanzadas de conectividad WiFi y un conjunto ampliado de periféricos, lo que facilita la programación, la comunicación y la gestión de los distintos módulos del sistema. A través del ESP32 se integran y controlan los sensores de temperatura, TDS y turbidez, además de los módulos destinados al almacenamiento de datos, la visualización local y la transmisión de información hacia la plataforma ThingSpeak en la nube.

Fig. 2. Placa de desarrollo ESP32. Tomado de <https://www.ubuy.com.co/>



#### A.2 Sensores de Turbidez, TDS y Temperatura.

Algunos de los parámetros utilizados para evaluar la calidad del agua corresponden a los valores de turbidez, TDS

y temperatura. Este último resulta especialmente relevante, ya que la medición de TDS depende directamente de la temperatura del líquido, por lo que su registro preciso es fundamental para obtener lecturas confiables.

En la Fig. 3 se presenta el sensor de turbidez utilizado. Este dispositivo corresponde a un sensor óptico diseñado para medir la concentración de partículas en suspensión dentro del líquido, combinando la transmisividad y la velocidad de dispersión de la solución. El módulo incorpora tanto una salida digital como una salida analógica; sin embargo, dado que la salida digital funciona únicamente como un indicador de tipo on-off, se optó por emplear la salida analógica, la cual proporciona un voltaje entre 0 y 4.5 V, permitiendo obtener mediciones continuas y más precisas. El sensor es capaz de detectar niveles de turbidez en un rango de 0 a 1000 NTU.

Fig. 3. Sensor de Turbidez. Tomado de <https://www.ferretronica.com/>



Para la medición de PPM se empleó el sensor mostrado en la Fig. 4. Este dispositivo corresponde a un sensor de conductividad formado por dos electrodos ubicados en su extremo, los cuales permiten determinar la concentración de sólidos disueltos en el agua mediante la variación de conductividad eléctrica del líquido. El módulo incorpora una salida analógica que facilita la lectura continua del valor de TDS y su posterior conversión a PPM mediante la calibración correspondiente. Asimismo, el funcionamiento del sensor depende de la temperatura del medio, por lo que su lectura se complementa con el registro de temperatura para asegurar una compensación adecuada y mejorar la precisión de las mediciones.

Fig. 4. Sensor de TDS. Tomado de <https://electronilab.co/>





El último parámetro fisicoquímico considerado en el sistema es la temperatura. Para su medición se empleó el sensor mostrado en la Fig. 5, el cual corresponde a una termocupla sumergible diseñada para registrar la temperatura de líquidos hasta un máximo de 125 °C. Este sensor cuenta con una salida digital, lo que permite obtener lecturas estables y precisas, además de facilitar su integración con el microcontrolador para la compensación térmica requerida por otros sensores, como el de TDS.

Fig. 5. Sensor de Temperatura DS18B20 sumergible. Tomado de <https://www.ferretronica.com/>



#### A. 3. Pantalla LCD con modulo I2C.

Para la visualización de las variables medidas se utilizó una pantalla LCD 16x2 con módulo I2C mostrado en la Fig 6, lo que redujo el número de conexiones requeridas y permitió la transmisión eficiente de los datos desde el ESP32 mediante comunicación I2C. Este elemento proporcionó una lectura inmediata de los valores de temperatura, TDS y turbidez durante el monitoreo.

Fig. 6. Pantalla LCD 16x2 con modulo I2C. Tomado de <https://www.tecnopura.com/>

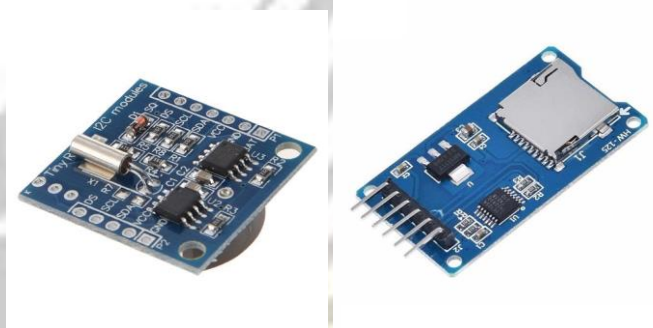


#### A 4. Modulo SD y RTC.

Para la adquisición de datos en cualquier sistema de monitoreo resulta fundamental contar con mecanismos de registro y almacenamiento, así como con la asignación correcta de fecha y hora para cada muestra. Con el fin de garantizar un respaldo confiable de la información obtenida en

tiempo real, se integró un módulo SD para el almacenamiento de datos y un reloj de tiempo real (RTC) para el registro temporal de cada lectura, tal como se muestra en la Fig. 7.

Fig. 7. Modulo RTC y Modulo SD. Tomado de <https://www.ferretronica.com/>



#### A 4. Fuente de Alimentación para Protoboard 5V-3.3V (700 mA).

Para la alimentación del sistema se utilizó una fuente externa capaz de suministrar voltajes estables de 5 V y 3.3 V y capaz de suministrar corriente máxima de 700mA, requeridos por los distintos módulos y sensores. El uso de esta fuente garantizó un suministro adecuado de corriente y una operación más estable durante la toma de datos. El módulo empleado, seleccionado por su tamaño compacto y bajo costo, se muestra en la Fig. 8.

Fig. 8. Fuente de Alimentación para Protoboard 5V-3.3V (700 mA). Tomado de <https://www.ferretronica.com/>

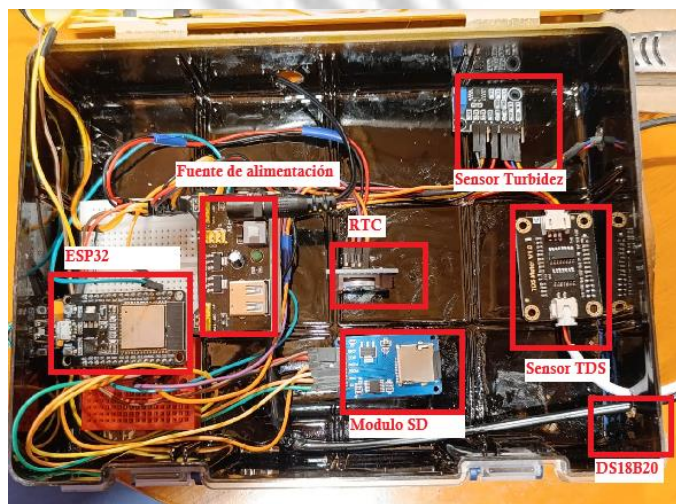


#### A 5. Implementación física.

Tal como se muestra en la Fig. 9, las conexiones internas del sistema se organizaron de manera que los cables quedaran fijados a la caja, garantizando estabilidad durante la operación. La caja, fabricada en plástico, fue seleccionada por su resistencia a la humedad y su capacidad para proteger el

sistema al trabajar en entornos con presencia de líquidos. Las conexiones se dispusieron de forma ordenada para facilitar la identificación de cada sensor y módulo, y se integró una fuente de alimentación encargada de suministrar energía a todos los componentes del sistema.

Fig. 9. Conexiones y disposición interna del sistema.



En el exterior de la caja, mostrado en la Fig. 10, se aprecia la integración de la pantalla LCD 16×2, utilizada para la visualización en tiempo real de las variables medidas. Asimismo, se observan las salidas correspondientes a los tres sensores, cuyos cables están diseñados para permitir su inmersión directa en las muestras de agua durante las pruebas. La disposición externa de estos elementos facilita el acceso a los sensores y la supervisión del sistema, mientras que la estructura de la caja asegura la protección del módulo electrónico frente a salpicaduras y condiciones de humedad, también para método de identificación se incluyó un logotipo con el nombre del proyecto junto con el escudo de la universidad.

Fig. 10. Exterior del sistema.



## B. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE.

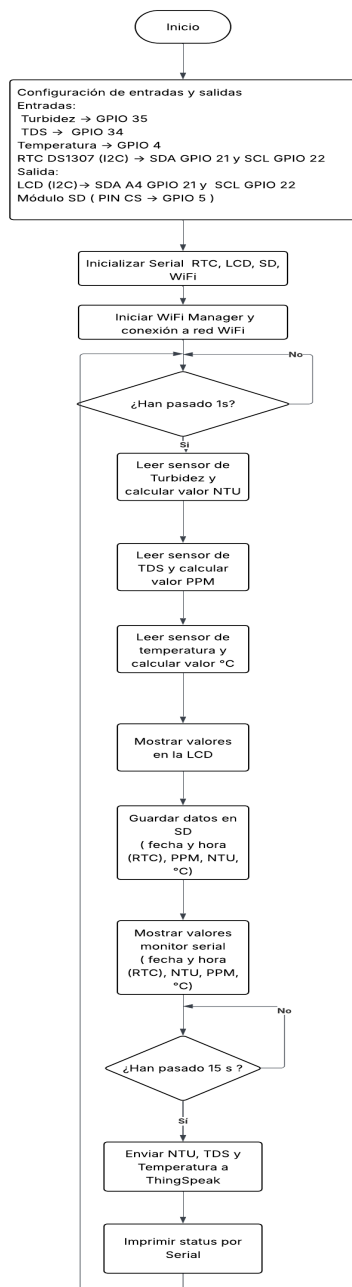
Siguiendo el diagrama de bloques presentado en la Fig. 1, el desarrollo del código inicia con la configuración de las variables de entrada y salida, de acuerdo con la asignación de pines correspondiente a cada módulo y sensor conectado a la ESP32. Una vez definidas estas interfaces, se procede a la inicialización del módulo RTC, el módulo SD, la pantalla LCD y la conexión WiFi mediante la librería WiFiManager.

Posteriormente, el programa ejecuta el bucle principal, donde se implementa la lógica esencial para la adquisición y gestión de los datos. En este bucle, cada segundo se calcula el valor de NTU del sensor de turbidez utilizando la ecuación de parametrización obtenida experimentalmente en laboratorio, la cual se detalla en la subsección *C.1. Parametrización de los Sensores de Turbidez (NTU) y TDS (PPM)*. De manera análoga, se determina el valor de PPM a partir de la lectura del sensor de TDS. La medición de temperatura se obtiene mediante el sensor digital asociado, utilizando la librería DallasTemperature.

Los valores de NTU, PPM y temperatura se muestran en la pantalla LCD y se almacenan en la tarjeta SD junto con la fecha y hora proporcionadas por el módulo RTC. De forma simultánea, la información adquirida se imprime en el monitor serial. Adicionalmente, cada 15 segundos el sistema envía los datos registrados a la plataforma ThingSpeak, mostrando en el monitor serial el estado de cada envío. Una representación simplificada de esta lógica se presenta en la Fig. 11, mediante un diagrama de flujo que resume el funcionamiento general del programa.



Fig. 11. Diagrama de flujo.

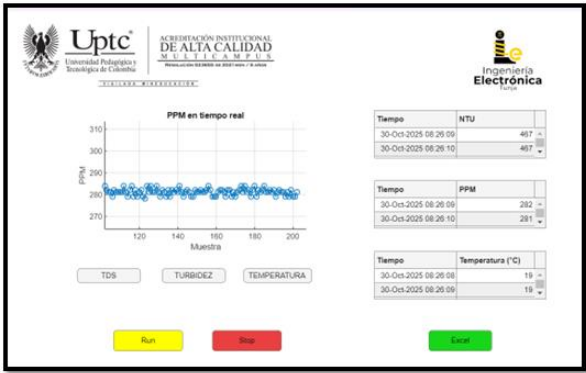


**B.1 Interfaz gráfica y configuración Wifi.**

La interfaz gráfica desarrollada permitió supervisar en tiempo real los valores de turbidez, TDS y temperatura adquiridos por el sistema, así como registrar y exportar los datos hacia un archivo Excel para su posterior análisis. Esta interfaz fue implementada en MATLAB mediante App Designer, estructura que facilitó la construcción de una aplicación funcional con elementos interactivos como botones,

tablas, gráficas y paneles de visualización. Dentro del entorno gráfico se integraron tres menús principales correspondientes a las variables medidas (NTU, PPM y temperatura), los cuales permitieron alternar entre las señales recibidas desde el microcontrolador. Adicionalmente, se incluyeron opciones para iniciar la adquisición (Run), detenerla (Stop) y generar automáticamente el archivo Excel con los datos registrados como se muestra en la Fig 12.

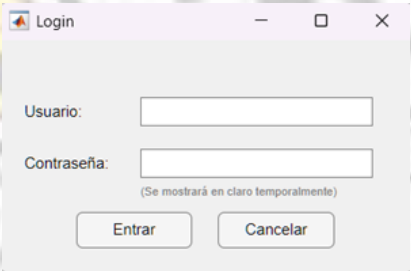
Fig. 12. Interfaz grafica.



Además de las funciones de visualización y registro de datos, la interfaz gráfica incorporó un mecanismo básico de autenticación que permitió controlar el acceso a la aplicación. Para iniciar el sistema, el usuario debió ingresar un nombre de usuario (“proyecto”) y una contraseña (“1234”), los cuales fueron validados antes de habilitar las funciones de monitoreo.

Este procedimiento buscó evitar el uso no autorizado de la interfaz y garantizar la integridad de los datos registrados. Aunque se trató de un esquema de autenticación simple, su implementación permitió establecer una capa inicial de seguridad a nivel de software, asegurando que solo personas autorizadas pudieran iniciar la adquisición de datos, activar la conexión serial y generar los archivos de registro correspondientes.

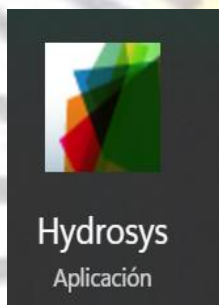
Fig. 13. Ventana de registro a la aplicación.



Con el fin de facilitar el uso del sistema sin requerir la instalación completa de MATLAB, la interfaz gráfica fue exportada como un ejecutable independiente (.exe) empleando la herramienta *Application Compiler* de MATLAB. El ejecutable generado permitió que cualquier usuario pudiera ejecutar la aplicación en un computador con Windows sin

necesidad de disponer de licencias adicionales, ya que incluía los componentes necesarios del *MATLAB Runtime*. De esta manera, la interfaz conservó todas sus funciones originales, incluyendo el ingreso de usuario y contraseña, la selección del puerto serial, la visualización en tiempo real de los parámetros fisicoquímicos, la generación del archivo Excel y las opciones de iniciar o detener la adquisición de datos. Esta estrategia garantizó una mayor portabilidad del software, facilitando su distribución para prácticas de laboratorio, validación del sistema en campo o demostraciones académicas sin comprometer la integridad ni la funcionalidad de la herramienta desarrollada.

Fig. 14. Aplicación de escritorio.



En cuanto a la conectividad del sistema, la configuración WiFi del ESP32 se realizó empleando la librería **WiFiManager**, la cual permitió automatizar el proceso de conexión a la red sin requerir la codificación manual de credenciales dentro del programa. En la primera inicialización, la tarjeta creó un punto de acceso temporal mediante el cual el usuario ingresó el nombre y la contraseña de la red WiFi. Una vez configurado este parámetro, la información quedó almacenada en la memoria flash del dispositivo, por lo que el sistema se conectó automáticamente en los siguientes encendidos.

Fig. 15. Sistema de conexión a internet.



### C. CONTRUCCIÓN DE MUESTRAS DE NTU Y PPM.

Para la calibración de los sensores de turbidez y TDS fue necesario preparar soluciones patrón con concentraciones conocidas. Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Tratamiento de Aguas de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,

bajo la supervisión del personal laboratorista observado en la Fig 16.

Fig. 16. Realización de soluciones.



En el caso de la turbidez, se empleó formacina, el estándar primario recomendado por la normativa APHA para la preparación de soluciones patrón expresadas en NTU [1]. A partir de una solución madre de 4000 NTU, se realizaron diluciones sucesivas mediante el método de dilución por mezcla volumétrica siguiendo la relación general:

$$C1V1=C2V2 \quad (1)$$

Donde  $C1$  y  $V1$  corresponden a la concentración y volumen de la solución madre, y  $C2$  y  $V2$  a la concentración y volumen deseados. De esta manera, se prepararon soluciones con turbideces entre 10 y 100 NTU, cuyas proporciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores para las soluciones de NTU.

C1	V1(ml)	C2	V2 (ml)	Microlitos
4000	1,25	100	50	1250
4000	1,125	90	50	1125
4000	1	80	50	1000
4000	0,875	70	50	875
4000	0,75	60	50	750
4000	0,625	50	50	625
4000	0,5	40	50	500
4000	0,375	30	50	375
4000	0,25	20	50	250
4000	0,125	10	50	125

Para la preparación de muestras destinadas a la medición de TDS (PPM), se trabajó con una solución madre de 10 000 PPM, obtenida a partir de sales solubles en agua ionizada. Las soluciones derivadas se elaboraron mediante dilución controlada aplicando la misma relación volumétrica mencionada anteriormente. Con ello se obtuvieron

concentraciones comprendidas entre 200 y 2000 PPM, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores para las soluciones de PPM.

C1	V1 (ml)	C2	V2(ml)
10000	10	2000	50
10000	9	1800	50
10000	8	1600	50
10000	7	1400	50
10000	6	1200	50
10000	5	1000	50
10000	4	800	50
10000	3	600	50
10000	2	400	50
10000	1	200	50

C.1. Parametrización de los Sensores de Turbidez (NTU) y TDS (PPM).

Teniendo en cuenta las soluciones realizadas para los valores de NTU y PPM y los instrumentos patrón para medir el valor real de cada reactivo de cada solución con los instrumentos patrón observados en la Fig 17 para la medición de los valores de NTU y Fig 18 para la medición de los valores de PPM que se encuentran en laboratorio.

Fig. 17. Instrumento patrón para medición de valores de NTU.



Fig. 18. Instrumento patrón para medición de valores de PPM.



A partir de la medición del voltaje de salida de los sensores de turbidez y TDS para cada una de las soluciones preparadas, y considerando los valores reales de concentración correspondientes, se procedió a registrar tres lecturas de voltaje por solución para cada sensor. Estos valores experimentales, utilizados posteriormente en el proceso de parametrización, se presentan en las Tablas 3 y 4 para los rangos de NTU y PPM, respectivamente.

Tabla 3. Valores de voltaje para las soluciones de NTU de cada solución.

TURBIDEZ				
VOLTAJE 1	VOLTAJE 2	VOLTAJE 3	Voltaje promedio	NTU (valor real)
3,886	3,959	3,910	3,918333333	11,6
3,661	3,950	3,842	3,817666667	22,3
3,768	3,773	3,729	3,756666667	36,1
3,730	3,739	3,715	3,728000000	48,5
3,700	3,695	3,710	3,701666667	56,6
3,700	3,656	3,607	3,654333333	67,8
3,631	3,592	3,602	3,608333333	83,7
3,583	3,587	3,587	3,585666667	92,8



Tabla 4. Valores de voltaje para las soluciones de PPM de cada solución.

TDS				
VOLTAJE1	VOLTAJE2	VOLTAJE3	Voltaje promedio	PPM (valor real)
0,709	0,660	0,714	0,69433333	509
0,508	1,065	0,997	0,85666667	774
1,339	1,344	1,359	1,34733333	1095
1,544	1,564	1,496	1,53466667	1300
1,618	1,676	1,608	1,63400000	1524

Para obtener la ecuación de parametrización de cada sensor, se graficó el voltaje promedio (eje x) frente al valor de NTU en el caso del sensor de turbidez, y frente al valor de PPM para el sensor de TDS. El comportamiento obtenido para ambas variables puede observarse en las Fig. 19 y Fig. 20, respectivamente.

Fig. 19. Instrumento patrón para medición de valores de NTU.

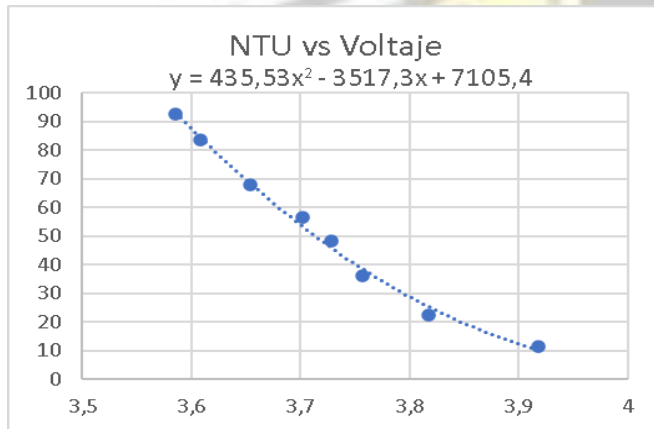
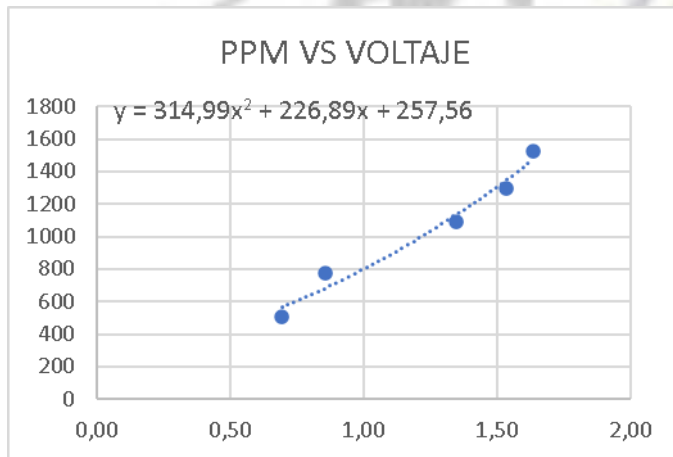


Fig. 20. Instrumento patrón para medición de valores de PPM.



Se observó que los datos obtenidos para ambos sensores presentaron un comportamiento de tendencia polinómica. A partir del ajuste de las curvas experimentales, se determinaron las ecuaciones cuadráticas que describen la relación entre el voltaje de salida y la concentración medida. Las expresiones resultantes fueron:

$$NTU = 435,53V^2 - 3517,3V + 7105,4 \quad (2)$$

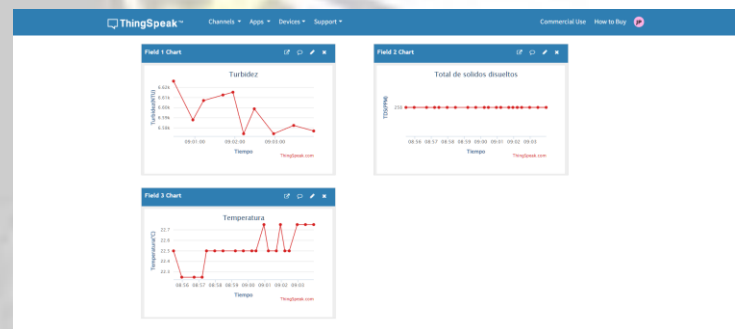
$$PPM = 314,99V^2 + 226,89V + 257,56 \quad (3)$$

Estas ecuaciones se utilizaron posteriormente en el programa para convertir las lecturas de voltaje en valores de turbidez y TDS dentro del sistema de monitoreo.

#### D. ENVIO DE DATOS A LA PLATAFORMA THINGSPEAK.

A través de la plataforma ThingSpeak se realizó el envío en tiempo real de los datos correspondientes a turbidez, TDS y temperatura. Cada variable fue asignada a un campo independiente dentro del canal configurado en la plataforma como se muestra en la Fig 21.

Fig. 21. Datos medidos observados en ThingSpeak.



De acuerdo con la figura anterior, cada parámetro medido se almacena en un campo independiente dentro de la plataforma, registrando en el eje y el valor de la muestra y en el eje x la fecha y hora correspondiente. Tal como se observa en la Fig. 22, las mediciones fueron enviadas en tiempo real con un intervalo de 15 segundos, seleccionado por garantizar un proceso de transmisión estable y acorde con las restricciones de actualización de ThingSpeak. Este periodo evita congestión en el envío de datos, reduce el consumo energético del sistema y proporciona una resolución temporal adecuada para el seguimiento continuo de los parámetros fisicoquímicos sin generar un volumen excesivo de información.



Fig. 22. Medición de datos en tiempo real y envío de datos a ThingSpeak.



E. COSTO TOTAL DEL PROYECTO.

De acuerdo con los módulos, sensores y componentes descritos anteriormente, así como la estructura física y el cableado utilizados en el proyecto, se elaboró el presupuesto total correspondiente al sistema final. El costo consolidado de los elementos empleados se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Costos elementos proyecto final.

Elemento	Precio en el mercado	Tienda
Sensor Turbidez	\$55.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
Sensor TDS	\$57.900 COP	<a href="#">Mercadolibre</a>
Sensor Temperatura	\$11.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
LCD y modulo I2C	\$24.800 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
Modulo SD	\$5.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
Modulo RTC	\$8.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
Fuente de alimentación	\$7.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
ESP32	\$35.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
Estructura principal y cableado	\$25.000 COP	<a href="#">Ferretrónica</a>
TOTAL	\$228.700 COP	

El costo total para la realización del proyecto fue de \$228.700 COP, equivalente aproximadamente a 59 USD según la tasa de cambio vigente. La mayoría de los componentes fueron adquiridos en tiendas locales, como Ferretrónica, lo que facilitó su disponibilidad y redujo los costos logísticos. Únicamente el sensor de TDS fue adquirido en una tienda nacional en línea, cuyo valor incluye el costo de envío correspondiente a \$15.000 COP, monto que se encuentra incorporado en el presupuesto final.

III. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con los valores obtenidos mediante los instrumentos patrón utilizados para la medición de NTU y TDS, correspondientes a las Fig. 17 y Fig. 18, se realizó la verificación de las lecturas de los sensores del sistema. Adicionalmente, para la medición de la temperatura para cada

solución se empleó un instrumento patrón específico como lo fue un termómetro de mercurio, mostrado en la Fig. 23, con el fin de garantizar la exactitud de las referencias utilizadas durante el proceso de calibración.

Fig. 23. Instrumento patrón para la toma de temperatura.



Se procedió a la toma de muestras correspondientes a cada una de las soluciones preparadas, tal como se ilustra en la figura siguiente.

Fig. 24. Toma de muestras con los sensores.



A partir de los datos obtenidos tanto con los sensores del sistema como con los instrumentos patrón, se realizó la comparación entre las mediciones registradas por los sensores, los valores proporcionados por los equipos patrón y las concentraciones teóricas de cada solución. Este análisis permitió evaluar el comportamiento y la precisión del sistema de medición. Los resultados correspondientes a los parámetros de NTU y PPM se presentan en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

Tabla 6. Comparación valores de NTU.

Datos obtenidos por sensor de NTU(Unidad Nefelométrica de Turbidez)									
Valor teórico	valor instrumento patrón	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4	Dato 5	Media	Desviación estandar	Error
10	11,6	16,88	16,5	16,7	16,8	16,93	16,722	0,14	0,02 44%
20	22,3	16,2	16	16,2	16,33	16,2	16,186	0,11	0,01 27%
30	36,1	31,29	31,1	31,2	31,45	31,84	31,376	0,26	0,07 13%
40	48,5	86,36	86,36	85	85,9	86,3	85,984	0,52	0,27 77%
50	56,6	88,52	88,7	88,21	87	88,9	88,268	0,67	0,45 56%
									Error 44%

Los resultados mostrados en la Tabla 6 obtenidos para el sensor de turbidez indican un comportamiento menos preciso que el observado en el sensor de TDS, con un error global del 44% y variaciones amplias respecto a los valores teóricos y al instrumento patrón. En el nivel de 10 NTU, el patrón registró 11,6 NTU, mientras que las mediciones del sensor oscilaron alrededor de 16,72 NTU, mostrando un error del 44%. Esto

evidencia una importante sobreestimación en valores bajos de turbidez, típica en sensores ópticos económicos debido a la sensibilidad de la luz dispersada ante pequeñas partículas o perturbaciones de la solución.

Para 20 NTU, el comportamiento fue similar, con un error del 27%, a pesar de que el instrumento patrón registró 22,3 NTU. La baja desviación estándar (0,11) refleja buena repetibilidad, pero una calibración insuficiente en este rango. En 30 NTU, el desempeño mejora notablemente: el error se reduce a 13%, y la media (31,37 NTU) se aproxima al valor de referencia (36,1 NTU), con una dispersión pequeña, lo que indica que el sensor trabaja con mayor precisión en turbideces cercanas a su punto óptimo de sensibilidad óptica.

Sin embargo, a partir de 40 NTU, se observa una desviación abrupta. El instrumento patrón registró 48,5 NTU, pero el sensor arrojó valores en torno a 86 NTU, generando un error del 77%. Para 50 NTU, se repite este comportamiento, con un error del 56%, lo que evidencia saturación del sensor o pérdida de linealidad en altas turbideces. Este fenómeno es común en sensores ópticos basados en transmisividad cuando la densidad de partículas dispersa demasiado la luz y el fotodiodo pierde capacidad de discriminación. El sensor de turbidez es confiable únicamente en rangos bajos-medios de NTU (20–30 NTU), mientras que en turbideces muy bajas o muy altas presenta errores significativos debido a limitaciones asociadas a su sensibilidad óptica.

Tabla 7. Comparación valores de PPM.

Datos obtenidos por sensor de TDS (ppm)									
Valor teórico	valor instrumento patrón	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4	Dato 5	Media	Desviación estándar	Varianza
400	509	631	520	536	558	610	571	42,7	1823,2
600	774	938	900	954	978	921	938,2	26,8	717,8
800	1095	1211	1201	1220	1250	1198	1216	18,7	349,2
1000	1300	1377	1358	1360	1377	1388	1372	11,4	129,2
1200	1524	1424	1420	1430	1400	1412	1417,2	10,4	108,2
									Error
									11%

Los resultados obtenidos en la Tabla 7 para el sensor de TDS muestran un comportamiento consistente con respecto al incremento de la concentración teórica y las mediciones del instrumento patrón. Sin embargo, se evidencia una desviación sistemática hacia valores superiores, especialmente en los rangos bajos (400–600 PPM). Para la concentración teórica de 400 PPM, el instrumento patrón registró 509 PPM, mientras que el sensor arrojó un promedio de 571 PPM, lo cual representa un error del 12%, asociado principalmente a la sensibilidad del sensor en concentraciones bajas y a la dependencia térmica del principio de conductividad.

En el caso de 600 PPM, la discrepancia aumenta con un error del 21%, mostrando que el sensor tiende a sobreestimar en este rango, posiblemente debido a la pendiente de la curva de calibración en la zona de transición entre bajas y medias conductividades. A partir de 800 PPM, el comportamiento mejora: para esta concentración el error disminuye a 11%, y se aprecia una reducción progresiva en la desviación estándar (18,7), indicando una mayor estabilidad en la lectura.

En los niveles de 1000 PPM y 1200 PPM, el desempeño del sensor se vuelve más preciso y estable. Para 1000 PPM, se observa un error de solo 6%, una desviación estándar baja (11,4) y una varianza menor a 130, reflejando un

comportamiento reproducible y consistente. Para 1200 PPM, aunque el valor promedio registrado (1417 PPM) está por debajo del instrumento patrón (1524 PPM), el error relativo es de apenas 7%, lo que confirma la mejor capacidad del sensor para operar en valores altos de TDS. En conjunto, el error del sistema para TDS fue del 11%, mostrando que el sensor presenta mejor precisión en concentraciones medias y altas, mientras que en concentraciones bajas tiende a sobreestimar los valores.

En el caso de la temperatura, no fue necesario registrar los datos en una tabla, dado que los valores medidos se mantuvieron aproximadamente en 20 °C para todas las soluciones evaluadas. El instrumento patrón reportó un valor cercano a 21 °C, lo que resultó en un porcentaje de error aproximado de 4,76 %, considerado aceptable para este tipo de sensor y las condiciones del ensayo.

TRABAJOS RELACIONADOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en esta investigación se compararon con diversos estudios recientes sobre sistemas de monitoreo de calidad del agua basados en sensores de bajo costo e infraestructura IoT. En general, los hallazgos coinciden con las tendencias reportadas en la literatura, particularmente en cuanto al comportamiento no lineal de los sensores de turbidez y TDS, su sensibilidad a condiciones de operación y la importancia de una calibración rigurosa.

En el estudio de Silva y Coello [2], contenido en el documento analizado inicialmente, se reporta que los sensores de turbidez presentan desviaciones relevantes respecto a los valores obtenidos con equipos de referencia, especialmente en rangos de baja concentración. De forma consistente, el presente trabajo evidenció errores elevados en los valores de 10–50 NTU (hasta 77%), lo cual confirma las limitaciones de los sensores ópticos económicos cuando la intensidad de dispersión es baja o cuando se presentan interferencias ambientales. Este comportamiento también fue documentado por Dubey et al. [3], quienes atribuyen estas discrepancias a fenómenos de saturación del fotodiodo y a la necesidad de realizar limpiezas periódicas para evitar incrustaciones en la ventana óptica.

En el caso del sensor de TDS, los resultados obtenidos muestran mayor estabilidad en rangos altos de concentración (1000–1200 ppm), donde se registraron errores entre 6% y 7%. Estos hallazgos concuerdan con lo expuesto por Kumar et al. [4], quienes señalan que los sensores de conductividad presentan mejor respuesta cuando la concentración iónica es alta, debido a que el ruido relativo disminuye y la señal eléctrica es más estable. Asimismo, Yehia et al. [5] demostraron que la precisión de estos sensores mejora considerablemente cuando se implementa compensación térmica, aspecto tenido en cuenta en este proyecto mediante el uso de un sensor digital DS18B20.

Por otra parte, estudios recientes que integran sensores de calidad del agua con plataformas IoT han mostrado que, a pesar de sus limitaciones metrológicas, estos dispositivos son útiles para el monitoreo continuo en tiempo real. Singh et al.



[6] y Putra et al. [7] destacan que la transmisión periódica de datos mediante plataformas como ThingSpeak o servicios LoRaWAN permite identificar tendencias y anomalías sin necesidad de equipos de laboratorio de alto costo. Los resultados del presente proyecto, con envíos cada 15 segundos, se alinean con estas conclusiones y demuestran la viabilidad de este enfoque.

Finalmente, varios autores enfatizan la importancia de protocolos de calibración basados en estándares trazables. En particular, la American Public Health Association (APHA) establece el uso de soluciones de formazina para la calibración de turbidez [8], metodología que fue aplicada directamente en el desarrollo experimental de este sistema. Esta práctica permitió obtener ecuaciones de parametrización ajustadas mediante modelos polinomiales, lo cual coincide con los modelos no lineales empleados en otros trabajos de calibración, como el desarrollado por Nabizadeh et al. [9].

### CONCLUSION

El desarrollo del sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua permitió evaluar la viabilidad de integrar sensores de bajo-medio costo, plataformas IoT y técnicas de calibración experimental para la medición en tiempo real de turbidez, TDS y temperatura en soluciones preparadas y controladas. A lo largo del proyecto se implementó un prototipo funcional basado en un microcontrolador ESP32, complementado con módulos de almacenamiento, visualización y comunicación en la nube mediante ThingSpeak, logrando registrar datos de forma continua y ordenada según los requisitos planteados inicialmente. El proceso experimental incluyó la preparación de soluciones patrón, la adquisición sistemática de datos y la construcción de modelos polinomiales de calibración, lo cual permitió analizar cuantitativamente el comportamiento y las limitaciones de los sensores empleados.

Al contrastar los resultados con los objetivos planteados, se confirma que el sistema desarrollado cumple con la capacidad de medir y transmitir los parámetros seleccionados con un nivel de precisión acorde con las características de los sensores utilizados. En particular, el sensor de TDS presentó un error global aproximado del 11%, con mejor estabilidad en rangos medios y altos de concentración. Por su parte, el sensor de turbidez mostró un error global del 44%, evidenciando sobreestimaciones especialmente en bajas y altas turbideces, lo cual está en concordancia con el comportamiento habitual de los sensores ópticos económicos. En cuanto a la temperatura, el sensor empleado presentó un error aproximado del 4,76%, mostrando un desempeño adecuado para las necesidades del sistema y suficiente para apoyar la compensación térmica requerida por el sensor de TDS.

Los resultados obtenidos evidencian que el desempeño del sistema depende directamente del rango de concentraciones evaluado y de las características metrológicas de cada sensor. En el caso de la turbidez, la respuesta del sensor mostró una variación significativa en presencia de partículas en

suspensión y condiciones de dispersión elevadas, mientras que el sensor de TDS presentó mayor estabilidad en soluciones con concentraciones medias y altas. De igual forma, el comportamiento del sistema se vio influenciado por factores como la presencia de sólidos, la homogeneidad de las soluciones y la temperatura del medio, elementos que condicionaron la lectura óptica y la conductividad medida.

El sistema desarrollado permitió monitorear en tiempo real los parámetros fisicoquímicos del agua mediante sensores de bajo costo, un ESP32 y plataformas de visualización local y remota. Aunque MATLAB facilitó la creación de una interfaz gráfica funcional, su dependencia de librerías adicionales impidió que la aplicación fuese completamente independiente. Asimismo, el envío de datos mediante WiFi mostró que el rendimiento del sistema depende estrictamente de la disponibilidad de una red estable, lo cual puede ser una limitación en zonas rurales. La plataforma ThingSpeak resultó útil para la supervisión remota, pero su operación es unidireccional: permite visualizar datos, aunque no ejecutar acciones directas sobre el ESP32, por lo que no es posible detener mediciones ni modificar parámetros desde la nube sin infraestructura adicional. A pesar de estas restricciones, el prototipo demostró ser viable para el monitoreo continuo y representa una base sólida para futuras mejoras.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] American Public Health Association, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 20th ed., Washington, D.C., USA: APHA, 1998.
- [2] A. Silva y P. Coello, Sistema de Monitoreo de Parámetros Físico-Químicos del Agua, Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [3] S. Dubey, R. Dwivedi, and P. Singh, "Design and Calibration of a Low-Cost Optical Turbidity Sensor," *International Journal of Scientific Research*, vol. 9, no. 4, pp. 12–18, 2020.
- [4] R. Kumar, S. Kumar, and V. Gupta, "Performance Evaluation of Low-Cost TDS Sensors for Water Quality Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 20345–20353, 2021.
- [5] S. Yehia, M. Refaat, and K. Abdalla, "Calibration and Temperature Compensation of Conductivity Sensors for Water Applications," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 48, pp. 102–112, 2022.
- [6] A. Singh, M. Patel, and R. Sharma, "IoT-Based Real-Time Water Quality Monitoring System Using ThingSpeak," *International Journal of Engineering Research in Electronics and Communication Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 29–35, 2020.
- [7] Y. Putra, G. Rahman, and M. Burhan, "Wireless Monitoring System for Surface Water Quality Using LoRa," *IEEE International Conference on Environmental Engineering*, pp. 244–249, 2019.
- [8] APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., American Public Health Association, 1998.
- [9] R. Nabizadeh et al., "Mathematical Modeling and Calibration of Turbidity Sensors Using Standard Formazin Solutions," *Water Science and Technology*, vol. 79, no. 11, pp. 2080–2087, 2019.

