

Caracterización y Análisis de la Calidad del Agua en Entornos Urbanos mediante la implementación de un Sistema Embebido con Tecnología IoT

Characterization and Analysis of Water Quality in Urban Environments through the Implementation of an Embedded System with IoT Technology

Néstor Rafael Salinas Buestán¹ <https://orcid.org/0000-0003-3814-9639>, Nicole Roxana Briones Yopez¹ <https://orcid.org/0009-0005-9041-3208>, Steven Isaias Quiroz Nieves¹ <https://orcid.org/0009-0004-8506-9193>, Diego Patricio Peña Banegas¹ <https://orcid.org/0000-0003-2108-4306>, Yadyra Monserrath Ortíz González¹ <https://orcid.org/0000-0001-8696-7463>

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
nsalinasb@uteq.edu.ec, rbrionesy@uteq.edu.ec
squirozn@uteq.edu.ec, dpena@uteq.edu.ec
yortizg@uteq.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2024/06/30

Aceptado: 2024/10/02

Publicado: 2024/10/15

Resumen

Este estudio tiene como objetivo caracterizar y analizar la calidad del agua en entornos urbanos mediante un sistema embebido con tecnología IoT, centrándose en la parroquia San Camilo, Quevedo, Ecuador, donde el crecimiento poblacional ha incrementado la demanda de agua potable. Se diseñó un sistema embebido que hace uso de un microcontrolador y sensores para monitorear en tiempo real parámetros críticos de la calidad del agua. Los datos recolectados se transmiten a una plataforma en la nube para su almacenamiento, análisis y visualización. Se prefirió el coeficiente de correlación de Spearman para el análisis estadístico de los datos. Esto permitió identificar patrones y relaciones entre las variables examinadas. Los datos revelaron asociaciones significativas en datos no lineales, facilitando una decisión en cuanto al desarrollo de modelos predictivos para la gestión y tratamiento del agua. Los resultados evidencian la viabilidad y eficiencia del uso de tecnologías IoT en el monitoreo continuo de la calidad del agua, ofreciendo una base científica para la recolección y tratamiento de datos relevantes en torno a

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión, Conclusiones.

Como citar: Salinas, N., Briones, N., Quiroz, S., Peña, D., Ortíz, Y. (2024). Caracterización y Análisis de la Calidad del Agua en Entornos Urbanos mediante la implementación de un Sistema Embebido con Tecnología IoT. *Revista Tecnológica - Espol*, 36(2), 98-112. Recuperado a partir de <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1194>

la calidad de agua potable en zonas residenciales, proporcionando una herramienta robusta para vigilar por la salud pública y el bienestar de los habitantes.

Palabras clave: Agua potable, Análisis estadístico, Calidad del agua, Computación en la nube, Microcontrolador, Monitoreo en tiempo real.

Abstract

This study aims to characterize and analyze water quality in urban environments using an IoT embedded system, focusing on San Camilo's community of Quevedo, Ecuador, where population growth has increased the demand for drinking water. An embedded system was designed to make use of a microcontroller and sensors to monitor critical water quality parameters in real time. The collected data is transmitted to a cloud platform for storage, analysis, and visualization. Spearman's correlation coefficient was preferred for statistical analysis of the data. This allowed for the identification of patterns and relationships between the variables examined. The data revealed significant associations in non-linear data, facilitating a decision regarding the development of predictive models for water management and treatment. The results demonstrate the feasibility and efficiency of using IoT technologies in the continuous monitoring of water quality, offering a scientific basis for the collection and processing of relevant data on the quality of drinking water in residential areas, providing a robust tool to monitor public health and the comfort of the inhabitants.

Keywords: Potable water, Statistical analysis, Water quality, Cloud computing, Microcontroller, Real-time monitoring.

Introducción

La calidad del agua es un factor de gran importancia para garantizar la salud pública y el bienestar de los habitantes de las ciudades, por lo que su monitoreo y análisis resulta indispensable al cumplir con ciertos estándares de calidad para asegurar su adecuado uso. Además, en entornos urbanos existe una mayor exposición a contaminantes, como residuos químicos y biológicos, lo que resalta la necesidad de evaluar regularmente la calidad del agua (Semarnat, 2023). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el rango aceptable del agua potable para consumo humano debe estar dentro de ciertos parámetros; por ejemplo, para sólidos disueltos totales (TDS) se encuentra entre 300 y 1000 ppm (partes por millón), el pH debe estar entre 6.5 y 8.5 (OMS, 2018), mientras que la Organización Panamericana de la Salud (OPS) establece que los niveles de turbidez aceptables están entre 0 y 5 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez) (OPS, 2008).

El Internet de las cosas (IoT) se ha hecho cada vez más popular para una amplia gama de aplicaciones, entre ellas la monitorización, donde mediante diversos dispositivos ofrece una solución para la adquisición de información relevante con la que se podría evaluar la calidad del agua, llevando a cabo un proceso de caracterización para comprender y describir sus atributos físicos, químicos y biológicos. Esta comprensión cuantificable permite identificar relaciones y patrones entre variables como temperatura, pH o turbidez (Jan, Min-Allah, & Düştegör, 2023).

En la ciudad de Quevedo, Ecuador, a pesar del creciente avance tecnológico, no se cuenta con datos específicos y actualizados sobre la calidad del agua potable, lo que representa un problema significativo para la gestión y el control de los recursos hídricos. La ausencia de investigaciones científicas aplicadas en esta área resalta la urgencia de implementar un sistema

de monitoreo que proporcione información precisa y en tiempo real. Por lo tanto, se propone el desarrollo e implementación de un sistema IoT que permita la monitorización continua de la calidad del agua en esta localidad, con el objetivo de llenar el vacío de datos y proporcionar una base importante para futuras investigaciones interdisciplinarias.

Trabajo relacionado

El proyecto liderado por Roque (2020) se centra en la importancia del agua y la necesidad de monitorear su calidad en tiempo real. Este estudio destaca la creciente escasez y deterioro del agua debido al aumento de la población y las actividades humanas. Propone soluciones mediante sistemas autónomos de monitoreo, destacando la eficiencia y la reducción de costos. El equipo desarrollado permite medir pH, temperatura y conductividad eléctrica en el agua utilizando tecnología de software y hardware libres y así tecnologías de IoT. Además, se realizaron pruebas de validación en el laboratorio, comparando los resultados con sensores comerciales de alta precisión, llevando a cabo un análisis estadístico para validar valores de los sensores, obteniendo datos similares a los equipos de referencia. Este estudio proporciona una base tecnológica valiosa para el proyecto, con un enfoque similar en sistemas IoT para monitorear la calidad del agua. Sin embargo, se diferencia al aplicar estas tecnologías específicamente a entornos urbanos, adaptando las soluciones a los desafíos y características particulares de estas áreas.

El proyecto "Sistema WaterAlert para el monitoreo del agua basado en el paradigma de Internet de las cosas (IoT) y la tecnología de comunicaciones de baja potencia" describe un sistema IoT diseñado para monitorear en tiempo real la calidad del agua. Equipado con sensores que miden pH, conductividad, turbidez y temperatura, el sistema recoge y transmite datos a una plataforma web para su análisis. Las pruebas realizadas en diferentes zonas rurales en la provincia de Loja, Ecuador, demostraron la capacidad para recopilar datos precisos y fiables, facilitando la detección temprana de problemas. El estudio concluye que la tecnología IoT es una solución viable para el monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales, ofreciendo una herramienta valiosa para mejorar la gestión del agua y asegurar su acceso seguro para las comunidades rurales (Guevara & Suntaxi, 2020). WaterAlert utiliza tecnología LoRaWAN para el monitoreo en entornos rurales, mientras que este proyecto emplea acceso wifi en áreas urbanas. El uso de esta tecnología proporciona mayor velocidad de transmisión y es adecuado para infraestructura urbana.

El estudio "Desarrollo de un sistema de monitoreo basado en IoT para la calidad del agua" (Carriazo, 2021) aborda la monitorización en tiempo real de la calidad del agua potable. Utilizando un microcontrolador y una Raspberry Pi 4, el sistema gestiona y transmite información a la nube a través de la plataforma PubNub. Este estudio se centra en hallar datos atípicos mediante este sistema de monitoreo, implementado en zonas rurales. Los sensores miden parámetros como pH, turbidez, temperatura, TDS, mejorando la toma de decisiones y asegurando una distribución de agua apta para consumo humano, especialmente en áreas de difícil acceso. Estos resultados y experiencias permiten dar paso al presente proyecto con el fin de aplicarlo en zonas residenciales de la provincia de Los Ríos, Ecuador.

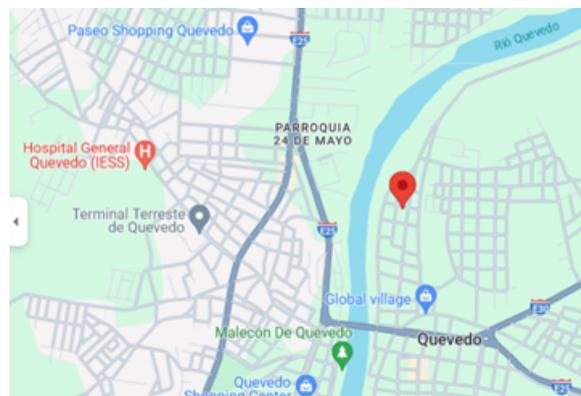
Materiales y Métodos

Área de Estudio

La parroquia San Camilo, ubicada en el cantón Quevedo de la provincia de Los Ríos, Ecuador, ha experimentado un notable crecimiento poblacional con un índice de 3,07% en los últimos años, lo que ha incrementado la demanda de agua potable (GAD Quevedo, 2020).

Para realizar el estudio sobre la calidad del agua se seleccionó esta parroquia en específico debido a su alta densidad de habitantes. El agua potable en la parroquia proviene de pozos profundos y una planta de tratamiento provisional. Se utilizó una cisterna de un domicilio de la zona para realizar el estudio.

Figura 1
Ubicación del domicilio



Conceptos importantes

Diseño y Creación del PCB

Un circuito impreso, también conocido como PCB (Printed Circuit Board), es un soporte físico que permite conectar los diferentes componentes eléctricos y electrónicos. Los circuitos impresos están compuestos por una o más capas conductoras. Para conectar pistas de distintas capas se utilizan orificios llamados vías que pueden atravesar completamente la PCB o solamente llegar hasta una determinada profundidad (Francisco, 2020). El diseño de un PCB se realiza utilizando software especializado conocido como EDA (Electronic Design Automation). Estos programas permiten crear esquemas electrónicos y planificar la disposición física de los componentes en la placa.

Diseño del Circuito Esquemático

El diseño esquemático contiene todos los componentes del sistema, y especifica cómo se realiza la interconexión de los mismos. Este diagrama es el que permite diseñar circuitos de forma sencilla. Mediante la unión de símbolos esquemáticos que representan cada uno de los elementos o redes utilizadas, este esquema actúa como guía para el diseño del circuito impreso. Permite visualizar, analizar y simular el comportamiento del circuito, pudiendo así corregir posibles errores antes de la fabricación (Arquero Gallego, 2022).

Reglas de Diseño

Las reglas de diseño son un conjunto de directrices que aseguran que el PCB cumpla con los requisitos eléctricos y físicos necesarios para su correcto funcionamiento. Estas reglas se basan en las necesidades y especificaciones del prototipo. Dentro de las reglas de diseño, el uso DRC (Design Rule Check) y ERC (Electrical Rule Check) es fundamental. DRC es una potente función automatizada que verifica la integridad lógica y física de un diseño, mientras que ERC se usa en cada placa enrutada para confirmar que cumple con una serie de parámetros recomendados (Silvestre, Salazar, & Marzo, 2019).

Enrutamiento de Pistas

Consiste en diseñar las rutas de cobre que conectan los componentes electrónicos según el esquema, asegurando conexiones eléctricas eficientes y minimizando interferencias. El diseño

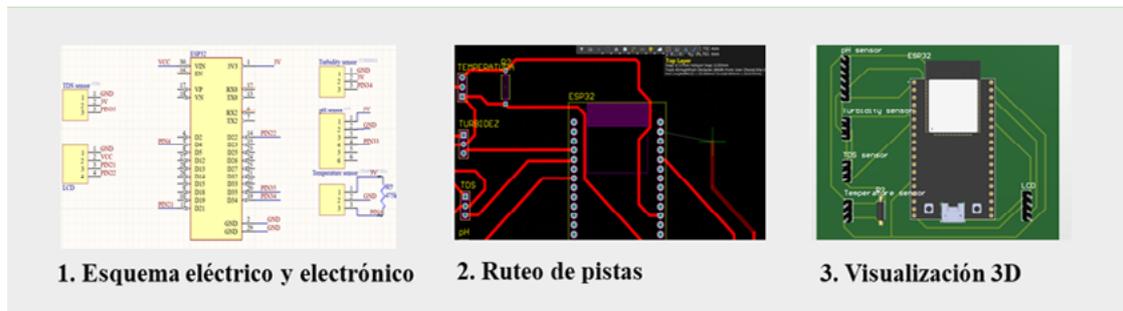
de estas rutas se conoce como pistas. El tamaño de las pistas varía según el tipo de señal: alimentación (VCC, GND), datos, etc.

Modo de Diseño en 3D

Permite examinar la disposición física de los componentes y pistas en la placa, asegurando ajuste y funcionalidad. Facilita la detección de errores, mejora la estética y optimiza la manufactura del producto final.

Figura 2

Pasos en el diseño y creación del PCB



Generación de Archivos de Fabricación

Los archivos de fabricación (Gerber files) son documentos vectoriales que contienen la información necesaria para fabricar una placa de circuito impreso. Estos archivos describen cada capa de un PCB, incluyendo las pistas, orificios y serigrafías. Luego, con el lenguaje G-Code (conjunto de instrucciones sencillas que indican a una máquina las operaciones que debe realizar, tal como movimientos, velocidad, cortes o perforaciones), se lleva a cabo un proceso de mecanizado, mismo que se traduce en secuencias de comandos G-Code (Teja, 2022).

Mecanizado del PCB

Las máquinas de control numérico (CNC) son dispositivos automatizados que utilizan el código G para ejecutar operaciones precisas como fresado y perforación en PCBs según el diseño especificado. En la etapa de Revisión y Verificación, se inspecciona la PCB terminada para asegurar que las conexiones y dimensiones sean correctas, cumpliendo con los estándares de diseño y funcionalidad establecidos anteriormente (Muñoz, 2013). En la etapa de Ensamblaje y Soldadura de Componentes, se debe comprobar que no haya cortocircuitos, utilizando un multímetro para verificar las conexiones.

Figura 3

Proceso de fabricación del PCB



Estadística Descriptiva

Luego de recolectar las variables relacionadas con la calidad del agua por medio de la implementación del sistema embebido, se lleva a cabo un análisis estadístico, enfocado a estudiar los métodos científicos para recoger, organizar, resumir y analizar datos, permitiendo sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en las relaciones intrínsecas de la calidad de agua (Acosta, Laines, & Piña, 2014). Por otro lado, una estadística descriptiva organiza, presenta y describe este conjunto de datos con el propósito de facilitar su uso, generalmente con el apoyo de tablas, medidas numéricas o gráficas. Estas herramientas ayudan a comprender el comportamiento de las variables, detectar patrones, entre otros (Faraldo & Pateiro, 2013).

Representación Gráfica de los Datos

La representación gráfica de datos en la investigación científica es indispensable. Sirve para lograr visualizar patrones y tendencias. Dependiendo de las necesidades específicas, se utilizan diferentes tipos de gráficos. Los histogramas, por ejemplo, son herramientas efectivas para mostrar la distribución y dispersión de datos numéricos por intervalos, ofreciendo ideas sobre la forma de los datos y posibles agrupamientos. Los gráficos Q-Q (quantile-quantile) son ideales para comparar datos observados con una distribución teórica como la normal. Por otro lado, los gráficos de dispersión exploran la relación entre variables, revelando concentraciones o dispersiones de puntos. Finalmente, los mapas de calor utilizan colores para representar la densidad o intensidad de una variable en una superficie bidimensional, proporcionando una visualización clara de patrones espaciales y anomalías (Medina, 2024).

Estadística Inferencial

La estadística inferencial es una rama de la estadística que se enfoca en generalizar conclusiones a partir de una muestra de datos, extrapolándolas a una población más amplia (Acosta, Laines, & Piña, 2014). La estadística inferencial agrupa un conjunto de técnicas que tratan de extraer conclusiones de los datos. A diferencia de la estadística descriptiva, que no infiere si no que describe, la estadística inferencial permite realizar inferencias (Menéndez, 2023). En este estudio, se tiene como objetivo generalizar los resultados obtenidos a partir de las mediciones de calidad del agua realizadas mediante sensores IoT en una cisterna. La inferencia estadística facilita el desarrollo de modelos predictivos que explican las relaciones entre estos parámetros, permitiendo la predicción y el control de la calidad del agua en condiciones futuras.

Tipo de Muestreo

El estudio utilizó un muestreo por conveniencia, dado que los datos fueron recolectados de una cisterna específica en la parroquia San Camilo, donde se disponía de sensores IoT instalados de manera estratégica dentro de la misma. Adicionalmente, se adoptó un enfoque sistemático al programar los sensores para tomar lecturas cada minuto, asegurando una recolección de datos constante y regular a lo largo del periodo de estudio de 30 días.

Correlación

La correlación es un tipo de asociación entre dos variables numéricas; específicamente evalúa la tendencia (creciente o decreciente) en los datos. Dos variables están asociadas cuando una variable proporciona información acerca de la otra. Por el contrario, cuando no existe asociación, el aumento o disminución de una variable no proporciona información sobre el comportamiento de la otra variable (Molina, 2021). Para este estudio, se toma como una referencia primordial para comprender la relación que pueden o no tener las variables.

Modelos de Correlación

Se evaluaron las relaciones entre las variables de calidad del agua utilizando diferentes modelos de correlación. Los modelos de correlación ayudan a determinar la fuerza y la dirección de las asociaciones entre dos variables cuantitativas. Las correlaciones de Pearson, Spearman y Kendall fueron utilizadas para proporcionar una visión completa de estas relaciones, permitiendo así una mejor interpretación de los datos obtenidos y facilitando la identificación de patrones y tendencias significativas en la calidad del agua.

Depuración de Datos

La depuración es el proceso de identificar y corregir errores, inconsistencias y datos irrelevantes o incompletos en un conjunto de datos. En este proyecto, se realizó la depuración de datos para asegurar la precisión y consistencia en cada variable, ya que es algo indispensable cuando se quiere caracterizar o establecer un modelo de correlación fiable.

Metodologías Aplicadas

Se emplearon diversas metodologías de investigación para asegurar la precisión y relevancia de los resultados. La investigación bibliográfica proporcionó una base teórica sólida mediante la revisión de literatura relevante en el campo del monitoreo de calidad del agua. En la investigación aplicada, se instalaron sensores programados para tomar lecturas de calidad del agua cada minuto y enviar los datos a la plataforma ThingSpeak, donde fueron depurados para garantizar su precisión. La investigación cuantitativa se utilizó para organizar y describir los datos mediante estadísticas descriptivas, representaciones gráficas y estimaciones de intervalos de confianza. Además, se evaluaron las correlaciones entre variables utilizando modelos de Pearson, Spearman y Kendall. La validación técnica incluyó la depuración de datos y la evaluación de modelos, asegurando la precisión y fiabilidad de los métodos aplicados. La combinación de estas metodologías permitió una comprensión integral del sistema de monitoreo.

Componentes Usados

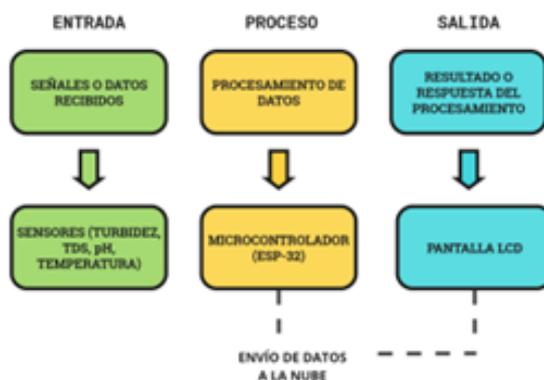
ITEM	NOMBRE	VARIABLE MEDIDA	ESPECIFICACIONES	IMAGEN
1	ESP-32 WROOM32	-----	Voltaje de Alimentación: 3.3V-5V Voltaje de E/S: 3.3V CPU: Tensilica LX6 240 MHz Dual Core Frecuencia de Reloj: Hasta 240Mhz Wifi: 802.11 b	
2	Módulo de sensor de turbidez	Unidades de Turbidez Nefelométrica (NTU)	Rango de Medición: 0 - 4550 NTU (0-5V) Consumo: 30mA Tipo de Señal: Analógica Rango de error: $\pm 0.5\%$ F*S	
3	PH0-14 Módulo de sensor de detección de pH	Potencial de hidrógeno (pH)	Rango de Medición: 0 - 14 pH (0-5V) Corriente de Trabajo: 5-10mA Tipo de Señal: Analógica/Digital Rango de error: $\pm 0.5\%$ F*S	
4	Módulos Sensor Análogo de Conductividad (TDS)	Total de Solidos Disueltos (TDS)	Rango de Medición: TDS: 0 - 1000 ppm Corriente de Trabajo 3-6mA Tipo de Señal: Analógica Rango de error: $\pm 0.5\%$ F*S	

ITEM	NOMBRE	VARIABLE MEDIDA	ESPECIFICACIONES	IMAGEN
5	Módulo Sensor De Temperatura Ds18b20	Temperatura	Rango de Medición: -67.0 °F a +257.0 °F Corriente de Trabajo: 1-5 mA Tipo de Señal: Digital Rango de error: ± 0.5% F*S	
6	Pantalla LCD con Módulo I2C	-----	Voltaje de Alimentación: 5V Interfaz de Comunicación: I2C Angulo de Visión: 6H Retroiluminación: (Azul con blanco carbón)	

Arquitectura del Sistema Embebido

En la etapa de entrada, se reciben señales o datos provenientes de diversos sensores que miden parámetros del agua, como pH, temperatura y conductividad. Estos datos son captados por los sensores y enviados al microcontrolador para su procesamiento. Durante la etapa de procesamiento, el microcontrolador se encarga de interpretar, analizar y procesar los datos recibidos, aplicando algoritmos específicos para mejorar la precisión.

Figura 4
Diagrama de bloques del sistema embebido

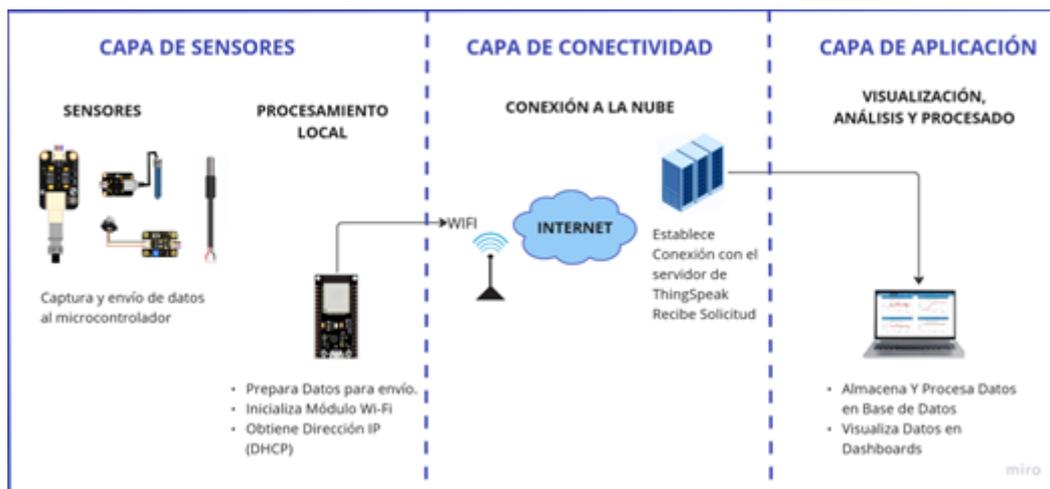


Además, tiene la capacidad de enviar los datos procesados a la nube, permitiendo la monitorización remota del sistema. Finalmente, en la etapa de salida, el resultado del procesamiento de los datos es mostrado en una pantalla LCD con el fin de informar al usuario los valores en tiempo real.

Arquitectura de la Red IoT

La arquitectura IoT es un proceso en el que la información viaja a través de la red, desde los sensores hasta un centro de datos o la nube. Los sensores capturan los datos y los envían al microcontrolador (uC), que los procesa localmente. Luego, el uC utiliza un módulo wifi para conectarse a Internet. Luego, se conecta a la red y resuelve el DNS para establecer una conexión con el servidor de ThingSpeak mediante protocolos de red. ThingSpeak recibe los datos, los almacena en su base de datos y los visualiza en dashboards en tiempo real.

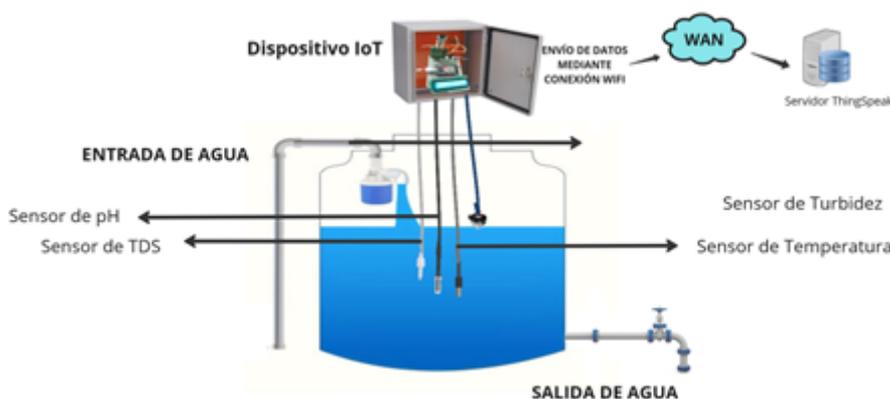
Figura 5
Diagrama de arquitectura de red IoT



Recolección de Datos

Los sensores fueron instalados estratégicamente en la cisterna y fueron programados para tomar y enviar lecturas cada minuto. Los datos recolectados fueron enviados en tiempo real a ThingSpeak. Esta plataforma almacena los datos en una base de datos, permitiendo descargar los archivos en formato CSV.

Figura 6
Esquema de la implementación del sistema



Manejo de Datos y Análisis en la Capa de Aplicación

Almacenamiento y Visualización de Datos con ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma abierta de Internet de las cosas (IoT), que nos permite recoger y almacenar datos de los sensores en la nube y visualizarlos en canales públicos, lo que facilita el monitoreo y análisis de la calidad del agua. ThingSpeak permite la creación de widgets personalizados, como gráficos de líneas y medidores, que son utilizados para visualizar los datos recolectados de manera intuitiva y efectiva (Daquilema Serrano, 2020).

Análisis y Procesamiento de Datos con Python

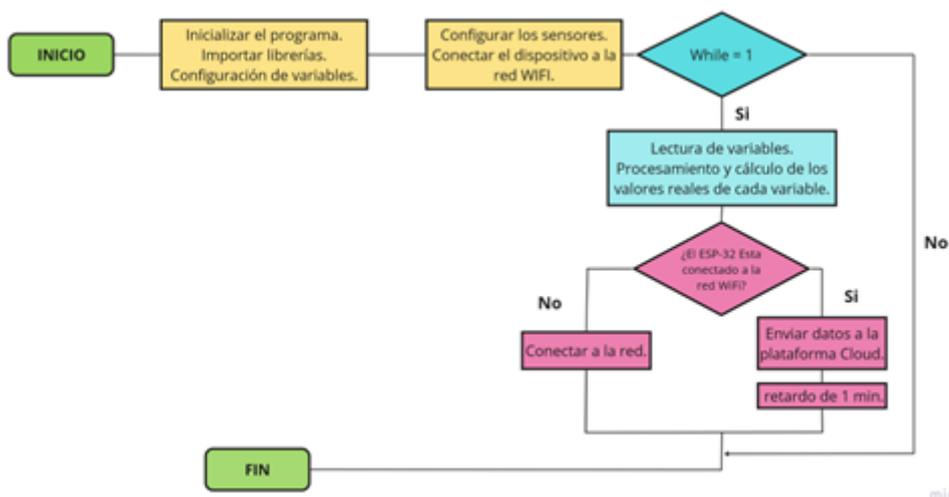
Para el análisis y procesamiento de los datos recolectados, se utilizó Jupyter Notebook como herramienta de desarrollo, la cual facilita la ejecución interactiva de código, visualización de datos y documentación en un solo entorno. El manejo y análisis de las estructuras de datos se realizó principalmente con la librería Pandas, especializada en la manipulación eficiente de

datos tabulares. Pandas se empleó para tareas como la limpieza, filtrado, agrupación y agregación de datos, permitiendo transformar y preparar los datos de manera efectiva para su análisis estadístico.

Programación del Firmware

Para el desarrollo del código del proyecto, se utiliza Visual Studio Code, junto con las librerías de Arduino IDE y ESP32.

Figura 7
Diagrama de Flujo del Funcionamiento General del Sistema Embebido



Resultados

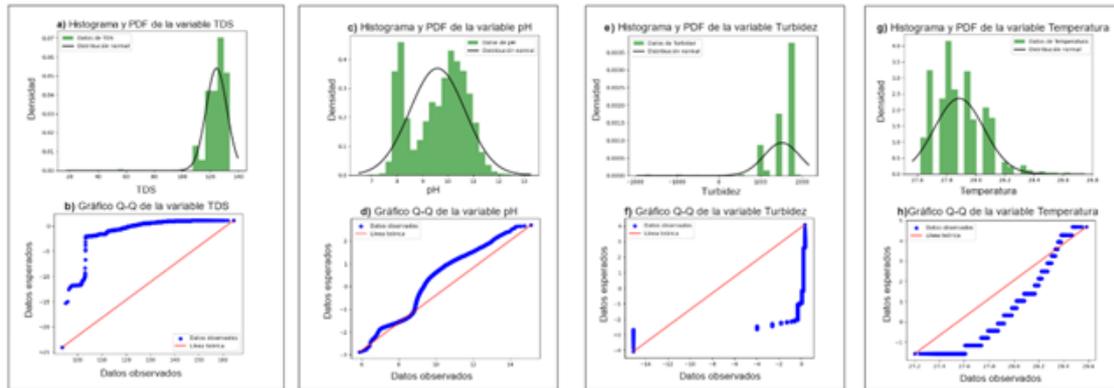
Se tomaron datos de cuatro variables independientes obtenidas por parte del sistema embebido: TDS, turbidez, pH y temperatura, además se capturaron los valores mínimos y máximos registrados por el dispositivo para cada variable. A partir de estos datos, se creó una variable dependiente categórica llamada "clasificación", que agrupa los resultados según criterios de calidad del agua (Tabla 2).

Tabla 2
Variables Dependientes e Independientes

VARIABLE	TIPO DE DATO	VALOR MIN	VALOR MAX
pH	Numérico	3	14
Temperatura	Numérico	4	37
Turbidez	Numérico	0	20.5
TDS	Numérico	0	1000
Clasificación	Categórica	Malo	Excelente

Análisis de Normalidad de Variables

Los datos utilizados en este estudio han sido obtenidos directamente del prototipo desarrollado para el proyecto, lo cual permite un análisis preciso de las variables involucradas. La recolección de datos se realizó durante un periodo de 27 días, con mediciones tomadas a intervalos de 1 minuto, lo que resultó en un total de 155,520 muestras.

Figura 8*Gráficos de análisis de normalidad de las variables****TDS (Total de Sólidos Disueltos)***

El histograma y la curva de densidad en la Figura 8 (a) no se alinean, indicando que los datos no siguen una distribución normal. El gráfico Q-Q en la Figura 8 (b) muestra desviaciones significativas, confirmando la asimetría de los datos.

Ph (Potencial de Hidrógeno)

El histograma muestra que los datos de pH en la Figura 8 (c) no siguen una distribución normal, con barras que no se alinean con la curva de densidad. El gráfico Q-Q de la Figura 8 (d) revela desviaciones significativas, especialmente en los extremos, indicando una asimetría positiva.

Turbidez

El histograma indica que los datos de turbidez en la Figura 8 (e) no siguen una distribución normal, con una alineación pobre en los extremos y valores negativos. El gráfico Q-Q en la Figura 8 (f) muestra desviaciones significativas de la línea de referencia, sugiriendo la presencia de valores extremadamente bajos.

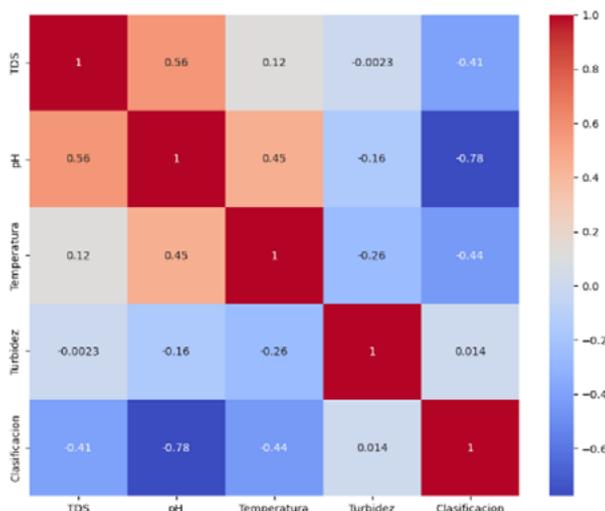
Temperatura

El histograma de la variable temperatura en la Figura 8 (g) sugiere una aproximación a la normalidad con agrupación alrededor de 27.8°C. El gráfico Q-Q Figura 8 (h) muestra que los datos transformados no se ajustan completamente a una distribución normal, con desviaciones en los extremos indicando colas más pesadas o ligeras.

Análisis de la Matriz de Correlación de Pearson

En el análisis de la correlación de Pearson entre las variables de calidad del agua (TDS, pH, Temperatura, Turbidez y Clasificación), se observaron varios patrones importantes. La correlación entre TDS y pH fue moderada y positiva (0.56), indicando que estos parámetros tienden a aumentar juntos. Similarmente, se encontró una correlación moderada y positiva entre pH y Temperatura (0.45). La correlación entre TDS y Temperatura resultó ser débil y positiva (0.12), mientras que la relación entre TDS y Turbidez fue insignificante (-0.0023). La correlación más significativa fue entre pH y Clasificación, la cual fue fuerte y negativa (-0.78), sugiriendo una relación inversa considerable.

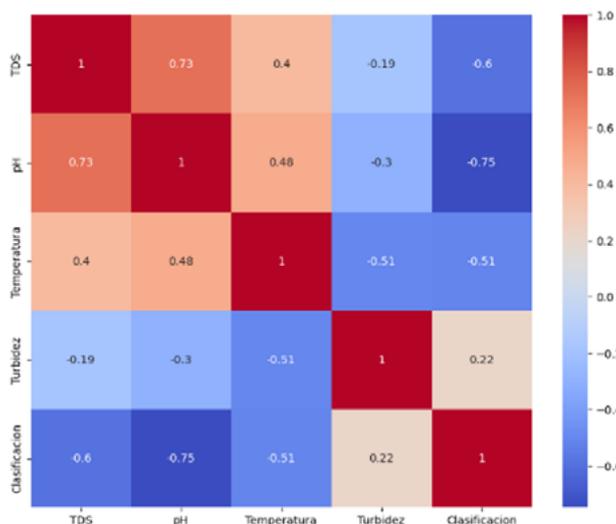
Figura 9
Matriz de Correlación de Pearson



Análisis de la Matriz de Correlación de Spearman

En el análisis de la correlación de Spearman entre las variables de calidad del agua, se observaron varios patrones significativos. La correlación entre TDS y pH fue alta y positiva (0.73), sugiriendo una fuerte asociación directa. La relación entre TDS y Clasificación fue negativa y moderada (-0.60), indicando que a mayores niveles de TDS, la clasificación de calidad del agua disminuye. El pH mostró una correlación negativa y alta con la Clasificación (-0.75), destacando una fuerte relación inversa. Por otro lado, la Temperatura presentó una correlación negativa moderada tanto con la Turbidez (-0.51) como con la Clasificación (-0.51), sugiriendo que temperaturas más altas están asociadas con menor turbidez y menor clasificación de calidad del agua.

Figura 10
Matriz de Correlación de Spearman

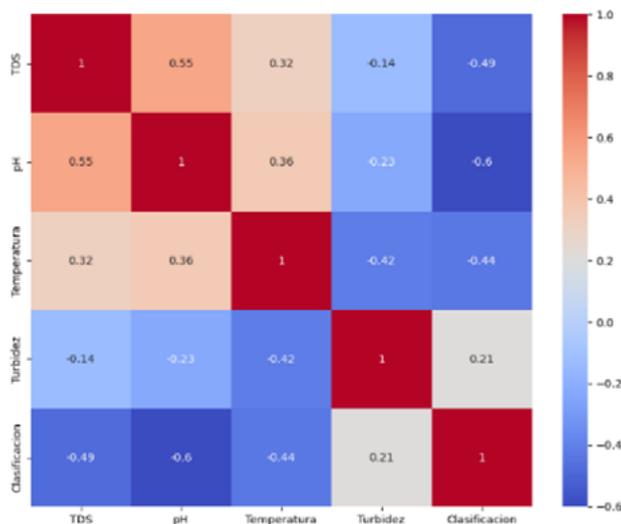


Análisis de la Matriz de Correlación de Kendall

En el análisis de la correlación de Kendall entre las variables de calidad del agua (TDS, pH, Temperatura, Turbidez y Clasificación), se identificaron varios patrones significativos. La correlación entre TDS y pH fue moderada y positiva (0.55), indicando una asociación directa. La

correlación entre TDS y Temperatura fue débil y positiva (0.32), mientras que la relación entre TDS y Turbidez fue débil y negativa (-0.14). Por otro lado, la Turbidez mostró correlaciones débiles y negativas con TDS (-0.14) y pH (-0.23), y una correlación moderada y negativa con Temperatura (-0.42). Finalmente, la Clasificación presentó correlaciones moderadas y negativas con TDS (-0.49), pH (-0.60), y Temperatura (-0.44).

Figura 11
Matriz de Correlación de Kendall



Discusión

El análisis estadístico ha permitido construir una matriz de correlación entre los diferentes parámetros de calidad del agua. Se ha determinado que el coeficiente de correlación de Spearman es el más adecuado para este conjunto de datos, ya que captura de manera más precisa las asociaciones presentes en datos no lineales, mismo que presenta correlaciones más fuertes y una mayor sensibilidad a las relaciones monótonas no lineales en comparación con los métodos de Pearson y Kendall. Además, los resultados obtenidos indican que los parámetros de calidad del agua monitoreados cumplen con los estándares establecidos por la OPS, lo que subraya la conformidad de los datos con las normativas internacionales (OMS, 2018).

Se ha logrado un diseño robusto en la construcción del PCB, empleando herramientas EDA avanzadas. Se asegura una disposición óptima de los componentes y una máxima eficiencia en la transmisión de señales. En comparación con la construcción de un PCB sin EDA ni reglas de diseño, que podría resultar en una disposición desordenada y menos eficiente, el uso de estas herramientas permite un diseño más preciso. Este dominio en el diseño proporciona una flexibilidad superior a las soluciones comerciales disponibles en el mercado, garantizando que cumpla exactamente con los requisitos establecidos.

Aunque los sensores utilizados mostraron precisión muy favorable al ser comparados con equipos comerciales, su desempeño podría verse influido por factores ambientales, como la temperatura o la humedad, lo que podría afectar la exactitud de las correlaciones de calidad del agua. No obstante, se considera que su precisión es adecuada para este estudio. Además, la necesidad de una conexión wifi estable para la transmisión de datos en tiempo real puede generar interrupciones en la recolección de datos en entornos urbanos con conectividad inconsistente, afectando la continuidad y calidad del análisis.

En general, se observa que, a diferencia de otros estudios en el monitoreo de la calidad del agua mediante tecnologías IoT enfocados en áreas rurales con tecnologías de baja potencia, la presente propuesta está adaptada a entornos urbanos con redes wifi, lo que permite una transmisión más rápida y estable. Además, a diferencia de otros estudios que evalúan un conjunto limitado de parámetros, este proyecto emplea modelos de correlación para analizar de manera amplia las relaciones entre múltiples parámetros. De este modo mejora la precisión en la detección de patrones complejos y optimiza la monitorización en áreas urbanas.

Conclusiones

Se ha evidenciado que la implementación de un sistema IoT basado en microcontroladores es viable y eficiente para el monitoreo continuo de parámetros críticos de calidad del agua en entornos urbanos. Se logró diseñar y ensamblar un sistema autónomo que permite la recolección de datos en tiempo real y la conectividad constante con una determinada plataforma en la nube para el almacenamiento y análisis de datos, lo que asegura una monitorización confiable y accesible desde cualquier lugar con conexión a Internet.

En Quevedo, no se tiene registro de la implementación de sistemas similares, lo que resalta la novedad y el impacto potencial de este proyecto. Además, la experiencia en la construcción del sistema ha permitido desarrollar habilidades prácticas en la implementación y manufactura del PCB, así como habilidades técnicas en el diseño del sistema. La conectividad mediante wifi ha facilitado el uso de IoT para el monitoreo continuo, mientras que la ciencia de datos ha sido una herramienta clave para analizar e interpretar la información de manera eficiente y precisa, potenciando el análisis de estas variables.

Para evaluar las relaciones entre los parámetros de calidad del agua, la matriz de correlación de Spearman fue seleccionada como la herramienta más apropiada, debido a su capacidad para manejar datos que no siguen una distribución normal. Este enfoque ha permitido identificar correlaciones mucho más significativas que otros métodos. Este proyecto representa una contribución significativa para la toma de decisiones informadas en relación con la seguridad y el bienestar de los habitantes que consumen este recurso natural.

Finalmente, estos hallazgos fomentan una continua integración de análisis de datos avanzados, como el aprendizaje automático, el cual podría mejorar la precisión de los modelos predictivos desarrollados para la gestión del agua, en donde se lleve a cabo la identificación y modelado de correlaciones entre los parámetros de calidad del agua analizados en esta estudio junto con otros nuevos factores externos, como cambios estacionales, eventos climáticos extremos, o variaciones en el uso del suelo.

Referencias

- Acosta, S., Laines, B., & Piña, G. (16 de 04 de 2014). *Repositorio Academico UPC*. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/316022/ma148_manual_2014_01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arquero Gallego, J. (2022). Obtenido de https://oa.upm.es/71917/3/TFG_Juan_Arquero_Gallego.pdf
- Candia, R., & Caiozzi, G. (17 de 09 de 2005). *Revista médica de Chile*. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-98872005000900017
- Carriazo, Y. (1 de 09 de 2021). Obtenido de <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/15481>

- Daquilema Serrano, Á. (21 de 08 de 2020). *Espol*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56408>
- Faraldo, P., & Pateiro, B. (16 de 06 de 2013). USC. Obtenido de http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_G2021103104_EstadisticaTema1.pdf
- FasterCapital. (5 de 04 de 2024). *FasterCapital*. Obtenido de <https://fastercapital.com/es/contenido/Desviacion-estandar--como-calcularla-e-interprelarla.html>
- Francisco, J. (30 de 04 de 2020). Obtenido de <https://cifpn1.com/electronica/?p=6402>
- GAD Quevedo. (16 de 06 de 2020). *Gobierno autonomo descentralizado municipal de Quevedo*. Obtenido de <https://quevedo.gob.ec/plan-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-2019-2023/>
- Guevara, L., & Suntaxi, H. (18 de 10 de 2020). *ESPE*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23414/1/T-ESPE-044191.pdf>
- Hiru. (25 de 6 de 2024). Obtenido de <https://www.hiru.eus/es/matematicas/medidas-de-tendencia-central>
- Jan, F., Min-Allah, N., & Düstegör, M.-A. (14 de 01 de 2023). Obtenido de MPDI: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/13/1729>
- Medina, F. (26 de 04 de 2024). Obtenido de https://portalacademico.cch.unam.mx/materiales/prof/matdidac/sitpro/exp/bio/guia-biologia3/Anexo_5.pdf
- Menéndez, P. (21 de 06 de 2023). *Ucrea*. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/30240>
- Molina, M. (10 de 06 de 2021). Obtenido de https://evidenciasenpediatria.es/files/41-13993-RUTA/25_Fund_Correlacion_v2.pdf
- Muñoz, L. (2013). *Ecorfan*.
- OMS. (24 de 04 de 2018). Obtenido de <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- OPS. (28 de 07 de 2008). Obtenido de <https://www.paho.org/es/documentos/guia-para-vigilancia-control-calidad-agua-situaciones-emergencia-desastre>
- Roque, A. S. (16 de 08 de 2020). *uaem*. Obtenido de <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1611/SERAQL08T.pdf?sequence=1>
- Semarnat. (14 de 02 de 2023). *Semarnat*. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Silvestre, S., Salazar, J., & Marzo, J. (01 de 2019). *UPCommons*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/190969>
- Teja, P. (8 de 9 de 2022). Obtenido de <https://www.mr-beam.org/es/blogs/news/que-es-un-codigo-g>