Monitoreo inteligente y gestión sostenible del agua en una olla de captación pluvial

Smart monitoring and sustainable water management in a rainwater harvesting pond

María Teresa Torres Mancera
Depto. Ingeniería Química. TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
http://orcid.org/0000-0002-4517-4456
teresa@tesco.edu.mx
Nancy Elizabeth Velázquez Salinas
Depto. Ingeniería en Mecatrónica. TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
http://orcid.org/0009-0003-6558-8909
nancy_mct@tesco.edu.mx
Anabel Martínez Guzmán
Depto. Licenciatura en Administración e Ingeniería en Gestión empresarial.
TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
https://orcid.org/0000-0002-8955-7336
anabel.sub.a@tesco.edu.mx

RESUMEN

En comunidades rurales la gestión del agua de manera sostenible constituye uno de los principales retos asociados a la seguridad hídrica y al desarrollo sostenible, particularmente en regiones con alta dependencia de la captación pluvial y limitadas capacidades de monitoreo ambiental. El objetivo del presente proyecto fue desarrollar una plataforma inteligente, realizar de manera sostenible la gestión del agua y el monitoreo en una olla de captación pluvial ubicada en la comunidad de San Bartolomé Actopan, Temascalapa, Estado de México, mediante la integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), análisis fisicoquímico y estrategias de conservación del recurso hídrico. El proyecto se desarrolló en un enfoque aplicado y descriptivo, que incluyó la caracterización inicial del agua y el diseño tecnológico de la arquitectura del sistema de monitoreo. Los análisis fisicoquímicos mostraron valores de pH de 10.2, nitritos de 0.3 mg/L y fosfatos de 0.326 mg/L, además de una concentración de oxígeno disuelto de 7.57 mg/L y una temperatura de 19.7 °C, evidenciando la necesidad de implementar mecanismos de seguimiento continuo para la toma de decisiones ambientales. Como resultado, se diseñó un sistema inteligente basado en sensores ambientales, comunicación digital y

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

alimentación fotovoltaica, orientado al monitoreo de variables críticas del recurso hídrico. La propuesta tecnológica desarrollada consta de un modelo replicable para la gestión comunitaria del agua y contribuye al fortalecimiento de estrategias de resiliencia hídrica y sostenibilidad ambiental en comunidades rurales.

Palabras clave: Gestión sostenible del agua, Internet de las Cosas, captación pluvial, resiliencia hídrica, monitoreo ambiental, comunidades rurales.

ABSTRACT

Sustainable water management in rural communities remains a major challenge for achieving water security and sustainable development, particularly in regions that rely on rainwater harvesting systems and have limited environmental monitoring capabilities. The objective of this project was to develop an intelligent platform for the monitoring and sustainable management of water in a rainwater catchment pot located in the community of San Bartolomé Actopan, Temascalapa, State of Mexico, through the integration of Internet of Things (IoT) technologies, physicochemical analysis and water resource conservation strategies. The project was developed under an applied and descriptive approach, which included the initial characterization of the water quality and the technological design of the monitoring system architecture. The physicochemical analyses showed pH values of 10.2, nitrites of 0.3 mg/L and phosphates of 0.326 mg/L, in addition to a dissolved oxygen concentration of 7.57 mg/L and a temperature of 19.7 °C, evidencing the need to implement continuous monitoring mechanisms for environmental decision-making. As a result, an intelligent system was designed based on environmental sensors, digital communication and photovoltaic power, aimed at monitoring critical variables of water resources. The technological proposal developed constitutes a replicable model for community water management and contributes to the strengthening of water resilience and environmental sustainability strategies in rural communities.

Keywords: Water resource management, Internet of Things (IoT), rainwater harvesting, sustainable development, environmental monitoring, rural communities.

INTRODUCCIÓN

Un componente esencial del desarrollo sostenible es la seguridad hídrica, debido a que la calidad y disponibilidad del agua condicionan la estabilidad de los ecosistemas, la salud, la producción de alimentos y las actividades económicas. No obstante, el incremento de la demanda, la contaminación, la degradación de las cuencas y la variabilidad climática han intensificado las presiones sobre las fuentes convencionales de abastecimiento. En 2021, el nivel mundial de estrés hídrico alcanzó 18.6 %, lo que representó un incremento respecto de 2015; además, aproximadamente 3,200 millones de personas se localizan en regiones agrícolas con escasez. Esta situación afecta con

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

mayor intensidad a las comunidades rurales, donde la disponibilidad del recurso depende frecuentemente de las precipitaciones estacionales y de infraestructuras locales con capacidades limitadas de operación y seguimiento (FAO, 2021; UN-Water, 2024; UNESCO-WWAP, 2024).

En zonas rurales, la disponibilidad de agua solo es una parte de la problemática hídrica. A ella se suman las diferencias territoriales en el acceso al recurso, el deterioro de su calidad, las limitaciones de infraestructura y la falta de información ambiental continua para responder ante periodos de sequía o cambios en la precipitación. Por esta razón, la gestión del agua requiere considerar de manera conjunta su disponibilidad, calidad y uso, así como disponer de información que permita conocer las condiciones del recurso y orientar las decisiones sobre su aprovechamiento. Esta perspectiva adquiere especial importancia en las comunidades rurales, donde el agua interviene tanto en las actividades productivas como en los alimentos y las condiciones de vida de la población (UNESCO-WWAP, 2024; UN-Water, 2024).

La agricultura representa uno de los principales usos del agua y mantiene una relación directa con las condiciones del suelo y la producción de alimentos. La FAO (2021) señala que los recursos de suelo y agua utilizados en los sistemas agroalimentarios están sujetos a presiones crecientes, lo que hace necesario considerar formas de manejo acordes con las condiciones de cada territorio. En este contexto, el aprovechamiento del agua de lluvia y la calidad del agua constituyen alternativas que pueden incorporarse a la gestión local del recurso, particularmente en sitios donde el agua almacenada se destina posteriormente a actividades del campo.

Ante estas condiciones, una alternativa descentralizada es la captación de agua de lluvia, que complementa el suministro convencional, reduce la dependencia de fuentes subterráneas y almacena agua durante periodos de disponibilidad para su uso posterior. Los sistemas de captación pueden adoptar configuraciones diversas, desde instalaciones domésticas asociadas a techos y cisternas hasta reservorios superficiales destinados al riego, la producción pecuaria y otros usos comunitarios. Su desempeño depende de la precipitación, el área de captación, el almacenamiento, la demanda, las pérdidas físicas y los criterios de operación, por lo que su diseño debe responder a las condiciones climáticas y productivas de cada territorio (Amos et al., 2022; Lee et al., 2017; Campisano et al., 2017; Neibaur & Anderson, 2016; Ward et al., 2012).

Además de ampliar la disponibilidad, la captación pluvial puede contribuir a la adaptación climática y a la resiliencia hídrica cuando se incorpora a estrategias de gestión que contemplan variabilidad meteorológica, conservación del suelo, mantenimiento de la infraestructura y participación de los usuarios. Sin embargo, no todos los sistemas mantienen el mismo nivel de confiabilidad a través del tiempo. Las evaluaciones desarrolladas bajo diferentes escenarios climáticos muestran que las modificaciones en la distribución y frecuencia de la lluvia pueden alterar el volumen captado, la seguridad del suministro y los requerimientos de almacenamiento. Es así que,

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

la infraestructura de captación debe acompañarse de información dinámica que permita ajustar su operación frente a condiciones cambiantes (Neibaur & Anderson, 2016; Campisano et al., 2017; Toosi et al., 2020).

La sostenibilidad de estos sistemas hídricos no sólo debe valorarse únicamente a partir del volumen recolectado. Se reporta que su viabilidad debe analizarse considerando simultáneamente dimensiones sociales, hidrológicas, económicas y ambientales. Entre los aspectos relevantes para reducir la vulnerabilidad de la población se encuentran el ahorro y uso final del agua, el consumo energético, la inversión y el mantenimiento, la aceptación social y la capacidad de la infraestructura. La falta de mantenimiento, la ausencia de mecanismos de gobernanza y la poca participación comunitaria pueden disminuir los beneficios esperados, aun cuando la infraestructura tenga capacidad suficiente de almacenamiento (de Sá Silva et al., 2022; Campisano et al., 2017; GhaffarianHoseini et al., 2015).

Un aspecto crítico es que la captación y el almacenamiento no garantizan la calidad del agua para su uso. Durante la escorrentía se llegan a incorporar sedimentos, materia orgánica, nutrientes, microorganismos, residuos animales, partículas atmosféricas y contaminantes procedentes de las superficies circundantes. Posteriormente, durante el almacenamiento, la temperatura, el tiempo de residencia, la acumulación de sedimentos, la exposición solar y los intercambios biogeoquímicos pueden modificar parámetros como pH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y concentración de nutrientes. En consecuencia, la calidad del agua debe evaluarse conforme a su uso final, identificando las condiciones de esta en el tiempo (Amos et al., 2022; Lee et al., 2017; Ward et al., 2012).

Los reservorios superficiales rurales con respecto a los sistemas cerrados presentan retos adicionales ya que al estar expuestos al entorno, reciben aportes asociados a erosión, escorrentía agrícola, deposición atmosférica y actividades humanas o pecuarias. La presencia de nitrógeno y fósforo puede favorecer procesos de enriquecimiento de nutrientes y modificar la productividad biológica del ecosistema; mientras que variaciones elevadas del pH pueden afectar la respuesta de los organismos acuáticos y la disponibilidad de compuestos químicos. Estos procesos no necesariamente se expresan de manera constante, pues pueden intensificarse después de lluvias, durante periodos prolongados de almacenamiento o ante cambios en el nivel del agua y la temperatura. Por esta razón, los muestreos aislados ofrecen una representación limitada de sistemas con alta variabilidad temporal (Rozemeijer et al., 2025; Kodali et al., 2018).

La calidad del agua se llega a monitorear de manera convencional por agricultores en la toma manual de muestras y análisis posteriores en laboratorio. Estos procedimientos son indispensables para obtener resultados trazables y validar los instrumentos, pero su costo y periodicidad pueden limitar la detección de eventos de corta duración. El monitoreo de alta frecuencia complementa estas

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

metodologías al generar series temporales capaces de registrar fluctuaciones, tendencias y respuestas asociadas a eventos de precipitación, escorrentía o actividad biológica. No obstante, su utilidad depende de la selección adecuada de sensores, la calibración, el control de interferencias, la limpieza de los datos y el mantenimiento de los equipos instalados en campo (Rozemeijer et al., 2025).

El desarrollo de sensores de bajo consumo, sistemas embebidos y tecnologías de comunicación ha favorecido la aplicación del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en la vigilancia de recursos hídricos. Una arquitectura IoT permite conectar sensores, unidades de procesamiento, bases de datos, redes de comunicación y plataformas de visualización para registrar y transmitir información de manera continua. En el monitoreo del agua, estas soluciones se han aplicado para medir temperatura, pH, conductividad, turbidez, sólidos disueltos, oxígeno disuelto y nivel, entre otras variables. La información puede organizarse en tableros digitales, historiales y alertas que faciliten la identificación temprana de desviaciones (Kodali et al., 2018; Bogdan et al., 2023).

Jabbar et al. (2024) evaluaron en zomas rurales el uso conjunto de energía solar y comunicación LoRaWAN para el monitoreo de la calidad del agua. Su propuesta es un antecedente de interés para sistemas que requieren obtener información en sitios donde el acceso a energía eléctrica y conectividad puede ser limitado. Bajo estas condiciones, la selección de los componentes debe considerar tanto el consumo de energía como las condiciones ambientales a las que estará expuesto el equipo durante su operación. La comunicación LoRaWAN resulta pertinente en este tipo de aplicaciones porque permite enviar los datos obtenidos por los sensores a distancias mayores sin requerir una conexión permanente a redes convencionales. Estas características fueron consideradas en AQUA para plantear el monitoreo remoto de la olla de captación pluvial.

El uso de sensores de bajo costo requiere considerar que las mediciones pueden modificarse con el tiempo o por las condiciones del medio en el que operan. En sistemas destinados al monitoreo de agua, la acumulación de material sobre los sensores y la exposición continua a condiciones ambientales pueden afectar la calidad de los registros. Por esta razón, además de instalar los dispositivos, es necesario establecer rutinas de calibración, limpieza y verificación de las mediciones mediante análisis de referencia. La operación del sistema también debe prever qué ocurrirá con los datos cuando se interrumpa la comunicación, así como la disponibilidad de energía y la protección de los componentes instalados en campo. Estos aspectos son relevantes para que la información sea pertinente durante la medición de la calidad del agua y no dependa únicamente del sistema electrónico de los dispositivos (Bogdan et al., 2023; Rozemeijer et al., 2025; Tzounis et al., 2017; Jan et al., 2021).

En este contexto, la combinación de captación pluvial, monitoreo ambiental y participación comunitaria puede fortalecer en los sistemas productivos la capacidad de adaptación y mejorar la

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

planeación del uso del agua. En México, estas necesidades adquieren relevancia por la heterogeneidad climática, territorial y productiva. Las comunidades rurales ubicadas en regiones semiáridas dependen frecuentemente de la agricultura de temporal y de infraestructuras locales para almacenar agua durante la temporada de lluvias. Las variaciones interanuales de precipitación y la erosión de los suelos pueden afectar tanto el volumen disponible como la calidad de los escurrimientos que llegan a los cuerpos de almacenamiento. (FAO, 2021; UNESCO-WWAP, 2024).

El lugar de estudio es el municipio de Temascalapa que se ubica en la zona nororiental del Estado de México y cuenta con una superficie aproximada de 177.31 km² distribuida entre 14 localidades habitadas, entre ellas San Bartolomé Actopan. Su territorio se localiza entre 2,240 y 2,650 m s. n. m. y presenta clima templado semiseco, lluvias predominantemente estivales, precipitación media anual de 500 a 648.3 mm y temperaturas de 14 a 18 °C. Estas características evidencian una disponibilidad pluvial estacional y justifican la existencia de infraestructuras locales para captar y conservar los escurrimientos generados durante la temporada húmeda (Ayuntamiento de Temascalapa, 2025).

El uso de suelo del municipio es principalmente agrícola: 73.05 % de su superficie se destina a este uso, 14.28 % a actividades pecuarias y solo 0.21 % corresponde a cuerpos de agua. En Temascalapa, el 4.43 % del territorio presenta procesos de erosión. Los principales cultivos que se encuentran en la zona se encuentran maíz, haba, cebada, frijol, trigo, chícharo y calabaza, además de nopal y maguey, especies que se desarrollan bajo las condiciones semisecas de la región. Estas características del territorio hacen relevante el aprovechamiento y conservación del agua captada durante la temporada de lluvias. Asimismo, los procesos de erosión deben considerarse en el manejo de este tipo de infraestructura, debido al posible arrastre de suelo y otros materiales por escorrentía (Ayuntamiento de Temascalapa, 2025).

En San Bartolomé Actopan se cuenta con una olla de captación pluvial utilizada para almacenar agua destinada al apoyo de actividades productivas. Durante el diagnóstico realizado en el sitio se observó una disminución del nivel de agua almacenada, así como presencia de residuos en la olla. También se identificó que no se dispone de un registro continuo que permita conocer los cambios en el volumen y calidad del agua durante el periodo de almacenamiento.

La caracterización preliminar registró un pH de 10.2, nitritos de 0.3 mg/L, fosfatos de 0.326 mg/L, saturación de oxígeno de 103.3 %, oxígeno disuelto de 7.57 mg/L, temperatura de 19.7 °C y transparencia de 30 cm.

A partir del análisis de la información disponible y del reconocimiento realizado en la zona de estudio, se identificó la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas para el seguimiento de la olla de captación pluvial. Los trabajos consultados muestran diferentes aplicaciones en la captación de agua de lluvia y el monitoreo mediante IoT; sin embargo, las características de un reservorio rural

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

abierto plantean condiciones particulares para el seguimiento de la calidad del agua y su almacenamiento. En estos sistemas no basta con obtener y transmitir datos, ya que también deben considerarse la caracterización fisicoquímica del agua, el suministro de energía, el funcionamiento de los sensores en campo y su mantenimiento. A partir de estas necesidades, el proyecto AQUA plantea relacionar el diagnóstico de las condiciones del agua almacenada con una arquitectura de monitoreo diseñada para las condiciones de la olla de captación de San Bartolomé Actopan (de Sá Silva et al., 2022; Campisano et al., 2017; Jabbar et al., 2024; Rozemeijer et al., 2025).

El interés científico del proyecto se centra en relacionar la caracterización inicial del agua almacenada en una olla de captación pluvial con el diseño de un sistema para el monitoreo. El análisis fisicoquímico del agua permite establecer las condiciones en el momento del muestreo, mientras que la plataforma propuesta busca dar continuidad a este seguimiento mediante el registro periódico de las variables seleccionadas. Esta relación entre el diagnóstico del reservorio y el monitoreo permitirá, una vez implementado el sistema, disponer de registros históricos e identificar cambios en las condiciones del agua. El proyecto también mantiene relación con las acciones municipales orientadas a la conservación del recurso hídrico, infraestructura hidráulica, innovación y la participación social, así como con los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados con el agua, la infraestructura y las comunidades sostenibles (Ayuntamiento de Temascalapa, 2025; UNESCO-WWAP, 2024).

A partir de este contexto, el objetivo del proyecto fue realizar una caracterización inicial de la calidad del agua almacenada en la olla de captación pluvial de San Bartolomé Actopan, Temascalapa, Estado de México, y diseñar una plataforma para su monitoreo como apoyo a la gestión del recurso. Para ello, la arquitectura propuesta considera sensores para el registro de variables fisicoquímicas y ambientales, transmisión y almacenamiento de datos, un tablero para consultar la información y un sistema de alimentación fotovoltaica. Una vez implementada, la plataforma permitirá contar con registros periódicos que podrán utilizarse para dar seguimiento a las condiciones del agua y establecer criterios de alerta ante cambios en las variables monitoreadas.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El proyecto se realizó en la comunidad de San Bartolomé Actopan, en el municipio de Temascalapa, Estado de México. Localizado en la región nororiental, cuenta con una superficie territorial de 177.31 km², distribuida en 14 localidades habitadas. Geográficamente, se ubica entre los 2,240 y 2,650 m s. n. m., con un clima templado semiseco y un régimen de lluvias concentrado durante el verano. La precipitación media anual oscila entre 500 y 648.3 mm, mientras que la temperatura promedio anual se encuentra entre los 14 y 18 °C. Estas condiciones climáticas favorecen el

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

establecimiento de sistemas de captación pluvial como una estrategia que apoye en la disponibilidad del recurso hídrico en comunidades rurales (Ayuntamiento de Temascalapa, 2025).

La infraestructura objeto de estudio corresponde a una olla de captación pluvial utilizada para el almacenamiento temporal de escurrimientos superficiales destinados principalmente al apoyo de actividades productivas locales. Debido a su exposición directa a factores ambientales, este sistema constituye un sitio adecuado para determinar la calidad del agua y desarrollar herramientas tecnológicas en el monitoreo continuo y a la gestión sostenible del recurso hídrico.

Diseño de la investigación

El proyecto se desarrolló bajo una orientación cuantitativa, aplicada y de desarrollo tecnológico, con alcance descriptivo y prospectivo. El estudio integró dos componentes complementarios: la caracterización fisicoquímica inicial del agua almacenada en la olla de captación pluvial y el diseño de una plataforma inteligente establecida en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo continuo de variables ambientales e hidráulicas.

La fase descriptiva tuvo como finalidad generar una línea base de las condiciones del cuerpo de agua mediante la medición de parámetros fisicoquímicos representativos. Por su parte, la fase de desarrollo tecnológico se orientó al diseño conceptual de una arquitectura de monitoreo remoto capaz de adquirir, transmitir, almacenar y visualizar en tiempo real información para apoyar la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento y aprovechamiento sostenible del agua.

La metodología se dividió en cuatro etapas secuenciales:

1. Diagnóstico del sistema de captación pluvial y reconocimiento del sitio.
2. Caracterización fisicoquímica inicial del agua almacenada.
3. Diseño de la arquitectura tecnológica de monitoreo.
4. Definición de la estrategia de implementación y operación del prototipo.

Caracterización fisicoquímica del recurso hídrico

La caracterización del agua inicial se llevó a cabo determinando parámetros fisicoquímicos que se consideraron relevantes para evaluar las condiciones ambientales del reservorio. Los parámetros analizados fueron (Tabla 1):

Tabla 1.

Parametros Analizados

Parámetro	Unidad
pH	Unidades de pH
Nitritos	mg/L
Fosfatos	mg/L

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Saturación de oxígeno	%
Oxígeno disuelto	mg/L
Temperatura	°C
Transparencia	cm

Fuente: elaboración propia.

Las mediciones se efectuaron in situ empleando equipos portátiles calibrados conforme a las especificaciones de los fabricantes. Los parámetros fueron seleccionados por su relevancia para identificar alteraciones en la calidad del agua con la finalidad de establecer una parámetro base para el diseño del sistema de monitoreo continuo.

Los resultados obtenidos durante esta etapa fueron utilizados para identificar las variables críticas que deberán ser monitoreadas en tiempo real mediante la plataforma inteligente propuesta.

Asimismo, se consideraron como referencia las disposiciones normativas nacionales aplicables relacionadas con la calidad del agua en sus diferentes usos y los criterios ambientales reportados en la literatura científica para reservorios superficiales.

Diseño del sistema inteligente de monitoreo

Se diseñó una arquitectura tecnológica basada en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para que las variables ambientales y fisicoquímicas fueran monitoreadas de forma continua para determinar la calidad del agua.

El sistema propuesto integra cuatro componentes principales:

1. Adquisición de datos mediante sensores ambientales y fisicoquímicos.
2. Procesamiento y transmisión digital de la información.
3. Visualización y almacenamiento de datos.
4. Alimentación energética autónoma.

Las variables consideradas para el monitoreo incluyen: pH, temperatura, turbidez, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nivel del agua, salinidad y variables ambientales complementarias.

La información generada por los sensores será adquirida por un microcontrolador ESP32 y transmitida mediante protocolos de comunicación inalámbrica adecuados para aplicaciones rurales. El sistema contempla la integración de un dashboard para la visualización de en tiempo real e históricos, así como la generación de alertas tempranas cuando alguna variable exceda los rangos previamente establecidos.

Adicionalmente, el diseño incorpora un sistema de alimentación fotovoltaica con el objetivo de garantizar la autonomía energética del prototipo y facilitar su implementación en zonas con acceso limitado a infraestructura eléctrica.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Diseño experimental y fases de implementación

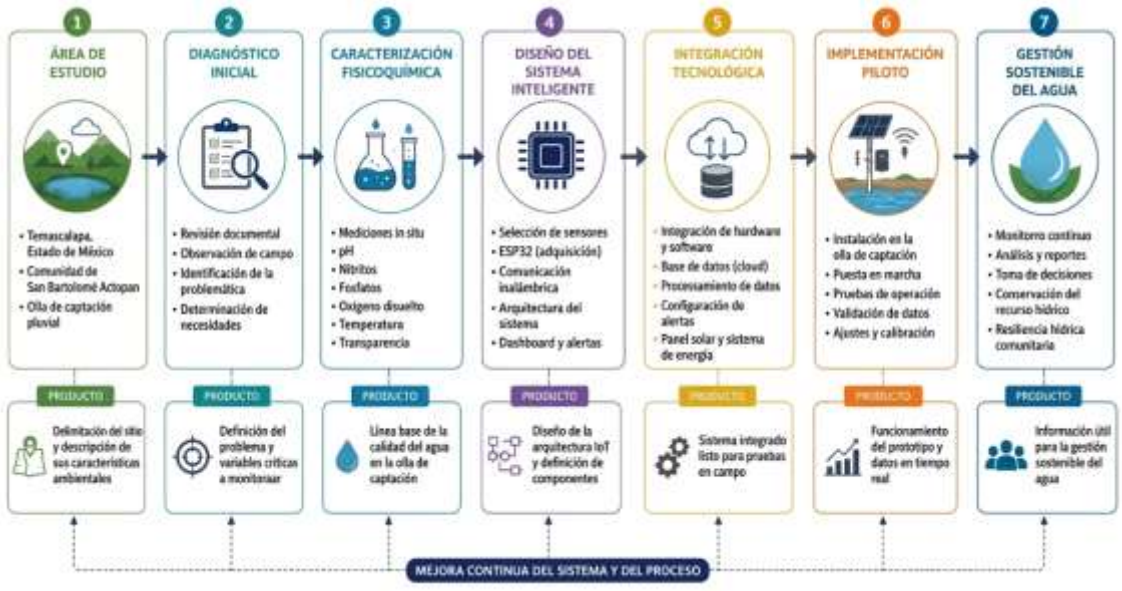
El proyecto se desarrolló en cuatro fases metodológicas (Figura 1):

Fase	Actividades principales
I. Diagnóstico	Identificación de la problemática y caracterización del sitio
II. Caracterización	Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua
III. Diseño tecnológico	Desarrollo de la arquitectura IoT y del sistema digital
IV. Implementación piloto	Integración y validación del prototipo en campo

Cada una de las fases contribuye al diseño integral de una plataforma inteligente orientada a la gestión sostenible y monitoreo del cuerpo de agua.

Figura 1.

Diagrama metodológico del proyecto.



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica del agua de la olla de captación pluvial

La caracterización inicial del agua almacenada en la olla de captación pluvial de la comunidad de San Bartolomé Actopan permitió establecer una línea base para evaluar las condiciones ambientales del reservorio y definir las variables prioritarias para el diseño del sistema inteligente de monitoreo. Los datos obtenidos muestran que el cuerpo de agua presenta condiciones

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

fisicoquímicas particulares asociadas a la dinámica de reservorios superficiales expuestos a procesos de escorrentía, evaporación e interacción con el entorno agrícola circundante (Tabla 2).

Tabla 2.

Caracterizacion Fisicoquimica Del Agua

Parámetro	Valores	Unidad
pH	10.2	-
Nitritos	0.30	mg/L
Fosfatos	0.326	mg/L
Oxígeno disuelto	7.57	mg/L
Saturación de oxígeno	103.3	%
Temperatura	19.7	°C
Transparencia	30	cm

Fuente: elaboración propia.

El valor de pH registrado fue de 10.2 (Tabla 2), lo que indica una condición alcalina. Este resultado supera el intervalo de referencia proporcionado por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 para agua destinada al consumo humano, que establece un intervalo de pH entre 6.5 y 8.5. Aunque el agua almacenada en el reservorio no se destina al consumo humano, el valor de pH registrado constituye un elemento importante para conocer sus condiciones fisicoquímicas y establecer su seguimiento en muestreos posteriores. La alcalinidad observada puede estar relacionada con diferentes factores, entre ellos la composición geológica del sitio, la presencia de carbonatos y bicarbonatos en el agua y la actividad fotosintética de los organismos presentes en el reservorio. Este último proceso puede disminuir la concentración de dióxido de carbono disuelto y contribuir al aumento del pH. Valores elevados de este parámetro pueden modificar la disponibilidad de algunos nutrientes y favorecer la precipitación de determinados compuestos, además de producir cambios en las condiciones del medio acuático (Jones & Smol, 2023; Kodali et al., 2018).

En el muestreo realizado, el oxígeno disuelto presentó una concentración de 7.57 mg/L y una saturación de 103.3 %. Estos resultados describen las condiciones encontradas en el reservorio durante el momento de la toma de muestra; sin embargo, no permiten establecer por sí solos el comportamiento del oxígeno a lo largo del tiempo. Este parámetro puede variar por efecto de la temperatura, la materia orgánica, la radiación solar y la actividad fotosintética, por lo que resulta conveniente realizar mediciones en diferentes momentos y condiciones ambientales (Rozemeijer et al., 2025).

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

En cuanto a los nutrientes analizados, se registraron concentraciones de 0.30 mg/L de nitritos y 0.326 mg/L de fosfatos. La presencia de estos compuestos justifica su seguimiento en muestreos posteriores, particularmente después de eventos de precipitación, cuando la escorrentía puede incorporar materiales procedentes del entorno al reservorio. No obstante, los valores obtenidos en este primer muestreo no permiten determinar el origen de los nutrientes ni establecer una condición de deterioro del agua. El registro periódico de estas variables permitirá conocer sus cambios a través del tiempo y valorar su posible relación con la precipitación y las actividades desarrolladas en el área circundante (Rozemeijer et al., 2025; Lee et al., 2017).

La transparencia fue de 30 cm durante el muestreo y proporciona una referencia sobre las condiciones observadas en la columna de agua. Debido a que se trata de un reservorio abierto, este parámetro puede cambiar por el ingreso y sedimentación de materiales, además de las variaciones propias del almacenamiento. En conjunto, los resultados obtenidos constituyen una caracterización inicial de la olla de captación y corresponden específicamente a las condiciones presentes durante el muestreo. Estos datos servirán como referencia para seleccionar las variables de seguimiento y, posteriormente, comparar las mediciones obtenidas mediante el sistema de monitoreo.

Diseño del sistema inteligente para monitorear la calidad del agua

El segundo resultado del estudio corresponde al diseño de la arquitectura tecnológica del sistema inteligente AQUA.

La propuesta integra herramientas de Internet de las Cosas, adquisición de datos ambientales y energías renovables con el propósito de desarrollar una plataforma adaptable a las necesidades de monitoreo en comunidades rurales.

La arquitectura tecnológica considera sensores ambientales y fisicoquímicos para el continuo monitoreo de variables críticas que indican la calidad del agua, un microcontrolador ESP32 para el procesamiento inicial de la información, sistemas de comunicación inalámbrica de bajo consumo energético y para el almacenamiento una plataforma digital y visualización de los datos obtenidos.

Una de las principales ventajas del sistema, radica en su modularidad y escalabilidad. La selección de componentes de bajo costo y disponibilidad comercial permite que la plataforma pueda ser replicada y adaptada a distintos cuerpos de agua superficiales utilizados con fines agrícolas o comunitarios.

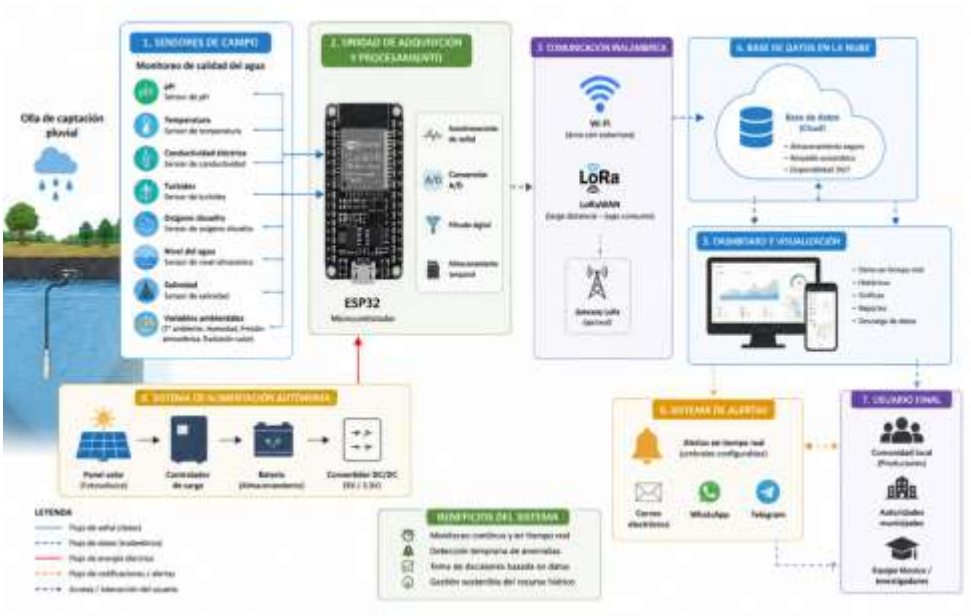
Diversos trabajos han mostrado la viabilidad del uso de tecnologías IoT para el monitoreo ambiental del recurso hídrico. No obstante, gran parte de las investigaciones se han concentrado en sistemas urbanos, plantas de tratamiento o redes de distribución, mientras que los reservorios rurales continúan representando un campo con importantes oportunidades de investigación y desarrollo tecnológico (Bogdan et al., 2023; Jabbar et al., 2024).

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

El diseño propuesto incorpora además un sistema de alimentación fotovoltaica que favorece su autonomía energética y reduce las limitaciones asociadas al acceso a infraestructura eléctrica en comunidades rurales (Figura 2). Esta característica resulta particularmente relevante en regiones donde la instalación de equipos convencionales puede verse restringida por factores económicos o geográficos

Figura 2.

Arquitectura tecnológica del sistema inteligente para el monitoreo de la calidad del agua.



Fuente: Elaboración propia

Potencial del sistema para la gestión sostenible

El tercer resultado del estudio corresponde al potencial de aplicación del sistema inteligente AQUA como herramienta para promover la gestión sostenible del agua en zonas rurales. El proyecto favorece la incorporación de principios de resiliencia hídrica al promover el aprovechamiento de tecnologías digitales adaptadas al contexto rural. La información generada por el sistema puede apoyar la planeación del uso del agua, la conservación de la infraestructura de captación y fortalecer la participación comunitaria.

La integración del monitoreo continuo permite transformar datos ambientales aislados en información útil que ayuda a la toma de decisiones para fortalecer la conservación del recurso hídrico. La posibilidad de registrar tendencias temporales facilita la identificación de anomalías en la calidad

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

del agua y auxilia en el diseño de estrategias preventivas antes de que ocurran afectaciones significativas en la olla de captación.

Desde la perspectiva tecnológica, el proyecto constituye un modelo replicable que puede implementarse en otros sistemas de captación pluvial del Estado de México y de otras regiones con características similares. La escalabilidad del sistema representa una oportunidad para integrar ciencia, ingeniería, monitoreo ambiental inteligente y acción comunitaria para que el recurso hídrico tenga una gestión sostenible. La recolección continua de información permitirá fortalecer la toma de decisiones, optimizar las estrategias de conservación del agua y contribuir al incremento de la resiliencia hídrica en comunidades rurales expuestas a condiciones de variabilidad climática.

CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió establecer una línea base de los parámetros fisicoquímicos del agua almacenada en la olla de captación pluvial ubicada en la comunidad de San Bartolomé Actopan, Temascalapa, Estado de México, evidenciando la necesidad de incorporar mecanismos de un monitoreo continuo que favorezcan a una eficiente gestión y sostenible del recurso hídrico. Los parámetros analizados mostraron que los reservorios superficiales rurales constituyen sistemas dinámicos en donde la calidad es posible que varie en función de factores ambientales, climáticos y productivos, por lo que requieren estrategias de seguimiento tecnológico que superen a los monitoreos tradicionales.

La integración de tecnologías de Internet de las Cosas en el diseño del sistema inteligente representa una alternativa de bajo costo y viable para el monitoreo de variables fisicoquímicas y ambientales en comunidades rurales. La arquitectura desarrollada para AQUA integra sensores para el seguimiento de las variables seleccionadas, comunicación inalámbrica, almacenamiento y visualización de los registros, además de un sistema de alimentación fotovoltaica.

La incorporación de estos componentes responde a las condiciones consideradas para la instalación del equipo en la olla de captación, donde el suministro de energía y la transmisión de datos deben contemplarse como parte del funcionamiento del sistema. La autonomía energética y el desempeño de la comunicación deberán verificarse una vez que el prototipo se encuentre instalado.

La caracterización inicial del agua permitió disponer de información sobre las condiciones fisicoquímicas presentes durante el muestreo y, al mismo tiempo, definir variables de interés para el sistema de monitoreo. Con esta relación entre el diagnóstico ambiental y la propuesta tecnológica se busca pasar de mediciones puntuales a registros obtenidos con mayor frecuencia. Una vez que el sistema entre en operación, estos datos permitirán observar la variación de los parámetros seleccionados y reconocer cambios que requieran una revisión más detallada de las condiciones del agua almacenada.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

En esta etapa, la arquitectura constituye una propuesta diseñada para las condiciones de la olla de captación pluvial de San Bartolomé Actopan. Su posible adaptación a otros reservorios rurales deberá analizarse después de evaluar su funcionamiento en campo, debido a que las condiciones ambientales, energéticas y de comunicación pueden variar entre sitios. Las siguientes etapas del proyecto comprenden la construcción e instalación del prototipo, la integración de los sensores y del sistema fotovoltaico, así como su validación durante un periodo de operación que permita valorar la continuidad de los registros, la transmisión de los datos y el comportamiento de los dispositivos bajo las condiciones ambientales del sitio.

REFERENCIAS

Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2016). Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A review. *Water, 8*(4), 149. https://doi.org/10.3390/w8040149

Ayuntamiento Constitucional de Temascalapa. (2025). *Plan de Desarrollo Municipal de Temascalapa 2025–2027*.

Bogdan, R., Paliuc, C., Crisan-Vida, M., Nimara, S., & Barmayoun, D. (2023). Low-cost Internet-of-Things water-quality monitoring system for rural areas. *Sensors, 23*(8), 3919. https://doi.org/10.3390/s2308391

Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research, 115*, 195–209. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056

de Sá Silva, A. C. R., Bimbato, A. M., Balestieri, J. A. P., & Vilanova, M. R. N. (2022). Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: A review. *Sustainable Cities and Society, 76*, 103475. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103475

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2021: Systems at breaking point*.

GhaffarianHoseini, A. [Amirhosein], Tookey, J., GhaffarianHoseini, A. [Ali], Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., & Raahemifar, K. (2015). Sustainable rainwater harvesting systems in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 448–461. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.068

Jabbar, W. A., Ting, T. M., Hamidun, M. F. I., Kamarudin, A. H. C., Wu, W., Sultan, J., Alsewari, A. A., & Ali, M. A. H. (2024). Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas. *Expert Systems with Applications, 242*, 122862. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Jan, F., Min-Allah, N., & Düştegör, D. (2021). IoT based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends and challenges for domestic applications. *Water, 13*(13), 1729. https://doi.org/10.3390/w13131729

Jones, I. D., & Smol, J. P. (Eds.). (2023). *Wetzel's limnology: Lake and river ecosystems* (4th ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2019-0-04412-3

Kodali, R. K., Jain, V., Karagwal, S., Srivastava, S., & Bhandari, V. (2018). IoT based smart water management systems: A systematic review. *International Journal of Engineering & Technology, 7*(2), 44–48.

Lee, J. Y., Bak, G., Han, M., & Kim, H. (2012). Quality of roof-harvested rainwater – Comparison of different roofing materials. *Environmental Pollution, 162*, 422–429. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.11.029

Neibaur, E. E., & Anderson, E. P. (2016). An examination of factors affecting sustainability of domestic rainwater harvesting systems in a rural, semi-arid region of Mexico. *Water Supply, 16*(5), 1388–1397. https://doi.org/10.2166/ws.2016.066

Rozemeijer, J., Jordan, P., Hooijboer, A., Kronvang, B., Glendell, M., Hensley, R., Rinke, K., Stutter, M., Bieroza, M., Turner, R., Mellander, P. E., Thorburn, P., Cassidy, R., Appels, J., Ouwerkerk, K., & Rode, M. (2025). Best practice in high-frequency water quality monitoring for improved management and assessment: A novel decision workflow. *Environmental Monitoring and Assessment, 197*(4), Article 353. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13795-z

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 11 de marzo). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Salud. (2022, 2 de mayo). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación.

Toosi, A. S., Daneshmand, H., Ferreira Gomes, H. P., Goharian, E., Bilan, S., & Jaafar, O. (2020). Assessment of climate change impacts on urban rainwater harvesting systems. *Science of the Total Environment, 709*, 136288. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136288

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering, 164*, 31–48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007

UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). *The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace*. UNESCO.

UN-Water. (2024). *Summary progress update 2024: SDG 6 – Water and sanitation for all*. United Nations.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2012). Performance of a large building rainwater harvesting system. *Water Research, 46*(16), 5127–5134. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.043

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.