

**Innovaciones en el uso del Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo ambiental en zonas rurales
de Colombia**

Deivid Duvan Lozano Bellaco

Asesor

William Alexander Cuevas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI
Ingeniería Electrónica

2026

Resumen

El documento tiene como propósito analizar innovaciones en el uso de internet de las cosas (IoT) para el monitoreo ambiental con un énfasis en la calidad del agua en zonas rurales de Colombia con una metodología la cual desarrolló una revisión sistemática de literatura con un enfoque cualitativo basado en la recolección y análisis de artículos científicos, documentos técnicos y estudios publicados entre el 2020 y 2026 en bases de datos académicas especializadas, los resultados evidencian que las tecnologías IoT permiten la medición continua de parámetros como PH, turbidez, temperatura y sólidos disueltos lo que además de facilitar la implementación de sistemas de alerta temprana se logra identificar beneficios en términos de reducción de costos, mayor frecuencia de monitoreo y viabilidad técnica en contextos rurales aunque están condicionados por factores como la conectividad digital y la infraestructura tecnológica junto con la capacitación comunitaria.

En conclusión las soluciones basadas en el internet de las cosas IoT representan una alternativa viable y estratégica para mejorar la gestión de los recursos hídricos en las zonas rurales, sin embargo su implementación requiere fortalecimiento de la estructura digital para garantizar la privacidad de los datos y la promoción de procesos apropiados en las comunidades.

Palabras clave: Internet de las cosas, calidad del agua, zonas rurales, monitoreo ambiental, distribución del agua.

Abstract

The document aims to analyze innovations in the use of the Internet of Things (IoT) for environmental monitoring, with an emphasis on water quality in rural areas of Colombia. It employs a methodology based on a systematic literature review with a qualitative approach, involving the collection and analysis of scientific articles, technical documents, and studies published between 2020 and 2025 in specialized academic databases. The results show that IoT technologies enable the continuous measurement of parameters such as pH, turbidity, temperature, and dissolved solids. In addition to facilitating the implementation of early warning systems, benefits are identified in terms of cost reduction, increased monitoring frequency, and technical feasibility in rural contexts. However, these benefits are conditioned by factors such as digital connectivity, technological infrastructure, and community training.

In conclusion, IoT-based solutions represent a viable and strategic alternative for improving water resource management in rural areas. Nevertheless, their implementation requires strengthening the digital infrastructure to ensure data privacy and the promotion of appropriate processes within communities.

Keywords: Internet of Things, water quality, rural areas, environmental monitoring, water distribution.

Tabla de Contenido

Introducción	9
Justificación	10
Problema del monitoreo ambiental en zonas rurales de Colombia.....	12
Planteamiento de el problema.....	12
Objetivos	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos	14
Antecedentes	15
Marco normativo	16
Marco contextual	17
Marco teórico-conceptual	18
Metodología de la Revisión Sistemática	20
realidad hídrica colombiana y transformaciones territoriales urbanas y rurales	28
Brecha de conectividad digital como barrera para la innovación.....	30
Vulnerabilidades en privacidad y seguridad de sistemas IoT.....	31
Crisis hídrica ambiental global y expresión local.....	32
Síntesis de la problemática y justificación de la innovación en IoT.....	34
La innovación en la IoT para el monitoreo ambiental se justifica.....	35
Innovaciones en arquitectura y tecnología IoT para el monitoreo ambiental en zonas rurales	36
Arquitectura IoT en capas para el monitoreo de la calidad del agua.....	36
Innovaciones en protocolos y tecnologías de comunicación.....	37
Sensores especializados de bajo costo para calidad del agua	38

Integración de inteligencia artificial y analítica avanzada.....	39
Adaptaciones de tecnologías para contextos rurales colombianos	41
comparación con sistemas de monitoreo convencionales	42
Resultados empíricos y viabilidad implementación	45
Resultados relacionados con la caracterización del problema hídrico y de conectividad OE1.	45
Arquitecturas y tecnologías IoT OE2	45
Validación técnica y económica OE3.....	45
Factores de adopción y sostenibilidad OE4.....	45
Métricas de desempeño y precisión del sistema	46
Pruebas de campo en contextos rurales	48
Análisis económico y viabilidad financiera.....	49
Consumo energético y sostenibilidad del sistema	50
Resultados en calidad del agua y generación de alertas	52
Transferencia tecnológica y potencial de escalamiento.....	53
Elementos críticos de procesos se encuentran	53
Factores habilitadores y sostenibilidad sistemática para la adopción de IoT en zonas rurales colombianas	55
Infraestructura digital y condiciones estructurales de conectividad.....	55
Barreras de conectividad para zonas rurales dispersas	56
Privacidad seguridad de datos y Marcos regulatorios IoT	57
Gobernanza del agua, justicia hídrica y articulación institucional	58
Educación digital, apropiación de tecnologías y capacidades locales.....	60
Recomendaciones para política pública y sostenibilidad de la innovación.....	61

Discusión.....	64
Conclusiones.....	67
Recomendaciones	69
Referencias Bibliográficas	70

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Flujograma PRISMA de la Revision Documental</i>	27
Figura 2 <i>Zonificación Hidrográfica e Hidrogeológica de Colombia</i>	29
Figura 3 <i>Sistema de Monitoreo Continuo de Calidad Hídrica Basado en IoT</i>	33
Figura 4 <i>Arquitectura Básica de un Dispositivo IoT: Diseño y Componentes Esenciales</i>	37
Figura 5 <i>Prototipo de Estación de Monitoreo de Calidad de el Agua en Entorno Rural</i>	42
Figura 6 <i>Comparación del Error Relativo Entre el Sistema IoT y el Equipo Patrón</i>	48
Figura 7 <i>Balance Energético</i>	51
Figura 8 <i>Brecha de Acceso a Internet en Colombia Según Región</i>	56
Figura 9 <i>Diagrama de Actores Involucrados en el Monitoreo de la Calidad del Agua Mediante Sistemas IoT</i>	60

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Cadenas de Búsqueda: IoT y Calidad del Agua en Zonas Rurales</i>	21
Tabla 2 <i>Cadenas de Búsqueda: Arquitectura y Componentes Técnicos de Sistemas IoT para Calidad de Agua.</i>	23
Tabla 3 <i>Infraestructura Digital, Gobernanza y Privacidad en el Uso del IoT para el Agua.</i>	25
Tabla 4 <i>Infraestructura Digital, Gobernanza y Privacidad en el Uso del IoT para el Agua.</i>	30
Tabla 5 <i>La Comparación General entre Monitoreo Convencional y Soluciones IoT de Bajo Costo para la Calidad del Agua</i>	43
Tabla 6 <i>Métricas Típicas de Desempeño en Sistemas IoT para la Calidad del Agua</i>	47

Introducción

El acceso al agua potable y su adecuada gestión genera un desafío global en el contexto del cambio climático, el crecimiento poblacional y la degradación ambiental los cuales son factores que afectan la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico en diferentes regiones del mundo lo que plantea un escenario del uso de las tecnologías emergentes como el internet de las cosas (IoT) el cual ha cobrado relevancia como una herramienta para el monitoreo ambiental en tiempo real lo que permite mejorar la toma de decisiones y la gestión del recurso sostenible del agua.

Hoy en Colombia observa que se enfrenta a importantes retos relacionados con la distribución equitativa del agua y el acceso a servicios de monitoreo de calidad del agua especialmente en zonas rurales a pesar de los avances en cobertura se observan brechas significativas entre áreas urbanas y rurales como en la infraestructura hídrica como en la conectividad digital esto limita la implementación de soluciones tecnológicas y a nivel local en comunidades rurales colombianas enfrentan problemáticas cuando las cuales se intensifican debido a condiciones cómo la baja cobertura internet, la falta de recursos y la escasa capacidad institucional para el seguimiento continuo de la calidad del agua lo que genera dependencia de métodos tradicionales de monitoreo los cuales resultan costosos, esporádicos y poco oportunos en este orden de ideas surge una problemática de investigación central en la necesidad de analizar como la innovación basado en el internet de las cosas puede contribuir al monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales de Colombia considerando brechas hídricas, tecnológicas y sociales existentes.

Justificación

La selección de el tema responde la urgencia de comprender y enfrentar múltiples situaciones que implica acceder al agua segura en las zonas rurales de Colombia en un contexto marcado por las desigualdades históricas con brechas de infraestructura y efectos crecientes del cambio climático lo cual genera que la calidad del agua consumida por las comunidades rurales se vea afectada por procesos de contaminación como las transformaciones territoriales y limitaciones en capacidades institucional para la vigilancia del recurso lo cual se traduce en riesgos directos para la salud pública cómo la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los modos de vida local, este escenario genera la implementación de tecnologías del internet de las cosas (IoT) para el monitoreo ambiental se presenta como una alternativa clave y estratégica para mejorar la disponibilidad, continuidad y accesibilidad de la información necesaria para la toma de decisiones de dicho recurso, a pesar de los grandes avances tecnológicos aún existe un número limitado de investigaciones locales que analizan de manera integrada la relación entre la realidad hídrica rural, brecha digital, innovaciones y marcos de distribución y privacidad de datos con la falta de investigaciones genera vacíos tanto en el conocimiento académico como en el desarrollo de estrategias de política pública y gestión comunitaria del agua lo que dificulta la capacitación y dar nuevas soluciones que sean a la vez técnicamente viables, socialmente justas y sostenibles en el tiempo, esta información brindada busca contribuir a llenar estos vacíos mediante un análisis articulado y profundo de referentes teóricos y empíricos los cuales ofrecen una visión crítica sobre las potencialidades y limitaciones de las soluciones de el IoT de bajo costo aplicadas a contextos rurales colombianos.

El documento se justifica por su potencial de impacto en los campos académicos, técnicos y comunitarios en el ámbito académico los hallazgos pueden servir de base para

desarrollos de nuevas líneas de investigación sobre monitoreo ambiental, justicia ética y transformación digital en entornos rurales. En el plano profesional y de política pública, el estudio proporciona insumos para el diseño de programas y proyectos que integran tecnologías IoT con estrategias de fortalecimiento de infraestructura digital, protección de datos, participación comunitaria y educación digital, aumentando la probabilidad de éxito de las intervenciones orientadas a garantizar el derecho del agua en zonas rurales. De este modo la monografía aspira a convertirse en un documento que sea útil para la toma de decisiones, organizadores sociales y equipos técnicos interesados en promover una adopción responsable y equitativa de innovaciones tecnológicas en la gestión de recursos hídricos

Problema del Monitoreo Ambiental en Zonas Rurales de Colombia

Planteamiento del Problema

En Colombia el acceso al agua de calidad en las zonas rurales continúa siendo un problema de estructura y del gobierno el cual se asocia a desigualdades territoriales con muchas limitaciones de infraestructura y condiciones ambientales que cada vez varían más ya que en las últimas décadas se han registrado avances en cobertura y modernización de servicios con una amplia brecha entre zonas urbanas y rurales tanto en la disponibilidad del agua como en la capacidad de poder el monitorearla y ver cambios en la calidad del recurso, esta situación no sólo afecta de manera directa a la salud pública, seguridad alimentaria y la sostenibilidad de modos de vida en las comunidades rurales (Bernal & Licona, 2024; IDEAM, 2022),

A esta realidad se le puede agregar la limitada infraestructura digital en territorios dispersos lo cual dificulta la implementación de sistemas de monitoreo continuo basados en tecnologías que van conectadas a la red con una baja cobertura internet en áreas rurales y con diferencias en el acceso según el nivel socioeconómico lo cual restringe a una opción de soluciones IoT que dependen netamente de la transmisión de datos. La consecuencia es que muchas comunidades siguen dependiendo de métodos convencionales de vigilancia del agua los cuales son esporádicos, costosos y poco oportunos para detectar alteraciones tempranas.

Que de forma paralela los sistemas IoT pueden presentar desafíos relacionados con la privacidad de los datos y la seguridad de la información en un contexto las zonas rurales tienen un gran desafío para la recolección de información sobre la calidad del agua, ubicación de fuentes hídricas y patrones de uso que puedan generar riesgos lo cual si no existen protocolos claros de protección y participación comunitaria, para esto la incorporación de tecnologías no puede limitarse a un aspecto técnico sino también se deben considerar los Marcos éticos,

normativos institucionales que orienten un uso responsable de la información generada (Coello Márquez, 2023; Ley 1581 de 2012).

Ya con este escenario planteado surge la necesidad de analizar de manera articulada las innovaciones basadas en IoT para el monitoreo ambiental y su aplicación en zonas rurales colombianas, existen desafíos que aún persisten vacíos para llevar a cabo estas soluciones pero se pueden responder de manera efectiva a las brechas hídricas y digitales bajo condiciones de costo, conectividad y apropiación social. Para esto se formula la siguiente pregunta de investigación

¿Cómo pueden las innovaciones basadas en el internet de las cosas (IoT) contribuir al monitoreo de calidad del agua en zonas rurales de Colombia frente a las grandes brechas hídricas digitales y de distribuciones existentes?

Objetivos

Objetivo General

Analizar las innovaciones basadas en el internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de calidad de agua en zonas rurales de Colombia, identificando las limitaciones y alcances técnicos de la tecnología como proceso de transformación sostenible.

Objetivos Específicos

Caracterizar la problemática del acceso al agua segura y brechas de conectividad digital en zonas rurales colombianas a partir de la revisión de estudios sobre realidad hídrica infraestructura TIC y desigualdades.

Describir las principales arquitecturas sensores protocolos de comunicación y enfoques de análisis de datos utilizados en sistemas IoT de bajo costo para el monitoreo de calidad de agua identificando sus ventajas y limitaciones frente a otros métodos convencionales.

Analizar resultados de validación técnica económica y operativa reportados en experiencias de implementación en sistemas IoT de monitoreo hídrico con énfasis en su permanencia para acueductos y comunidades rurales.

Examinar infraestructura digital privacidad de datos junto con la seguridad de los mismos, distribución del agua y educación digital comunitaria que inciden en la adaptación de soluciones IoT en zonas rurales.

Antecedentes

Ahmed y Al-Khalidi (2021), en su investigación titulada “Water quality monitoring system: A smart city application with IoT innovation” propusieron diseñar un sistema de monitoreo de calidad del agua con apoyo del internet de las cosas para una aplicación en una ciudad inteligente la cual mediante una arquitectura basada en sensores y transmisión de datos en tiempo real los cuales dieron varios hallazgos y mostraron que el sistema permite capturar variables físico químicas y apoyar la detección oportuna de anomalías y demostraron que el IoT constituye una alternativa útil para fortalecer la vigilancia continua de la calidad del agua (Ahmed & Al-Khalidi, 2021)

Bogdan y colaboradores (2023), en su estudio titulado “Low-cost Internet-of-Things water-quality monitoring system for rural áreas” demostraron que el desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad del agua de bajo costo para zonas rurales mediante un uso y una solución que dieron mediante el internet de las cosas con orientación a contextos con limitaciones de infraestructura los resultados evidenciaron la viabilidad técnica de la propuesta y su potencial adaptación a entornos rurales y demostrando que los modelos de bajo costo pueden contribuir al monitoreo de recursos hídricos donde existen restricciones económicas y de conectividad (Bogdan et al., 2023)

Chen y colaboradores (2023), en su investigación titulada “An intelligent water monitoring IoT system for ecological environment and smart cities” implementaron un diseño el cual en un sistema inteligente de monitoreo de agua para entornos ecológicos y de ciudades inteligentes las cual es mediante integración del IoT con capacidades de análisis de o avanzado se mostraron hallazgos que incorporaron un procedimiento inteligente para la mejora y

detección, seguimiento y condiciones críticas las cuales evidenciaron hora que yo te fortalece la respuesta frente a los cambios del sistema de agua (Chen et al., 2023).

Méndez (2020), en su artículo titulado “Los retos del acceso a agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales en Colombia” observaron que al analizar las dificultades estructurales que enfrentan las zonas rurales del país en relación al acceso al agua potable y el saneamiento básico con una revisión De las limitaciones del servicio también y sus implicaciones territoriales los hallazgos se evidenciaron persistentes desigualdades entre el campo y la ciudad demostrando que la problemática rural hídrica sigue siendo un desafío central para las políticas públicas y la gestión de dicho recurso (Méndez, 2020)

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2022), en la Encuesta de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Hogares (ENTIC) demostraron que al caracterizar las condiciones de acceso y de uso de tecnologías digitales en los hogares colombianos mediante levantamiento de datos estadísticos a nivel nacional con resultados que bien identificaron brechas marcadas entre las áreas urbanas y rurales en conectividad y el uso del internet con esto se demostró que la adopción de soluciones IoT en territorios rurales depende de condiciones digitales mínimas que todavía no están plenamente garantizadas (DANE, 2022)

Marco Normativo

En el marco normativo colombiano se relaciona con la prestación de los servicios públicos del agua potable mediante la protección del ambiente y el tratamiento de datos personales en la ley 142 de 1994 se regula los servicios públicos domiciliarios y establece criterios para garantizar la prestación eficiente y oportuna de servicios de acueducto en lo cual es fundamental para la calidad de vida de la población y para el abastecimiento de agua en zonas

urbanas y rurales la cual esta norma nos resulta relevante para la implementación de monitoreo de la calidad del agua y contribuye al control técnico de servicio y mejoramiento en su gestión.

De la siguiente manera la ley 99 de 1993 organiza el sistema nacional ambiental y orienta la protección de recursos naturales entre los cuales se verifica el recurso hídrico esta ley es importante para la investigación dado que el uso de tecnologías IoT en el monitoreo ambiental permite apoyar procesos de prevención, control y seguimiento de la calidad del agua en concordancia con los principios de conservación ambiental y el uso sostenible de los recursos.

La ley 1581 de 2012 establece las disposiciones generales para la protección de datos personales en Colombia con inclusión en este estudio la cual es pertinente debido a que los sistemas IoT pueden recopilar, transmitir y almacenar información sensible asociada a variables ambientales, ubicación geográfica y patrones de uso por esta razón cualquier implementación tecnológica debe garantizar los principios de seguridad informática y tratamiento de datos.

Marco Contextual

En Colombia el acceso al agua segura en la zona rurales de Colombia continúa siendo un desafío estructural debido a las brechas de infraestructura, conectividad digital y capacidad de monitoreo dado caso que en varios territorios rurales los sistemas de control tradicional de calidad del agua presenta limitaciones en frecuencia, cobertura y oportunidad de la información esto dificulta la toma de decisiones técnicas y comunitarias, a esto se le suma que la conectividad digital en varias zonas rurales aún es ineficiente por lo cual restringe la adopción de soluciones tecnológicas avanzadas y en relación el internet de las cosas se presenta como una variable para el monitoreo remoto de todos los parámetros para garantizar la calidad del agua especialmente en ambientes donde se requiere seguimiento continuo y de un bajo costo operativo desde la perspectiva de ingeniería electrónica estas soluciones permiten integrar sensores, micro

controladores, módulos de comunicación y plataformas de análisis de datos para generar información útil en tiempo real y para esta aplicación en las zonas rurales colombianas representa una oportunidad para fortalecer la vigilancia ambiental y apoyar la gestión sostenible del recurso hídrico.

Marco Teórico-Conceptual

El marco conceptual teórico se apoya en 3 ejes principales: el internet de las cosas, monitoreo ambiental y la gestión sostenible del agua. El internet de las cosas se entiende como una interconexión de dispositivos físicos capaces de capturar, transmitir y procesar información de manera remota y con una aplicación en el campo de la ingeniería electrónica la cual esta tecnología resulta útil para desarrollar sistemas de monitoreo automatizados, eficientes y adaptables a diferentes contextos.

El monitoreo ambiental por su parte apoya la construcción de una herramienta técnica para observar de forma continua el comportamiento de variables asociadas al entorno como el pH como la turbidez como la temperatura y sólidos disueltos su utilidad radica en que permite identificar cambios críticos en la calidad del agua y generar alertas tempranas que faciliten la toma de decisiones pero se observa que en La literatura persiste un vacío de integrar estas soluciones en condiciones territoriales, sociales y de conectividad propia en zonas rurales colombianas.

La gestión sostenible del agua requieren no sólo es soluciones tecnológicas sino también la articulación institucional sino también la protección de información y la apropiación social, el análisis IoT aplicado al monitoreo hídrico de ir más allá del componente técnico y considerar factores que permitan ver la viabilidad, seguridad y pertenencia territorial que permita identificar la verdadera contribución de estas tecnologías la cual no sólo es para medir únicamente variables

sino apoyar en procesos de gestión del recurso hídrico para que sea más eficiente, oportuno y equitativo.

Metodología de la Revisión Sistemática

El presente documento se enmarca en una investigación de tipo documental debido a que su objetivo consiste en analizar, organizar y sistematizar conocimiento previamente publicado sobre las innovaciones en el uso del Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales de Colombia y da un enfoque metodológico adoptado es cualitativo, ya que la investigación se orienta a la interpretación y síntesis narrativa de los hallazgos reportados en la literatura con el fin de identificar tendencias, aportes, limitaciones y vacíos de conocimiento relacionados con el tema de estudio. En cuanto al diseño, la investigación se desarrolla como una revisión sistemática de la literatura, de carácter no experimental, retrospectivo y de corte documental, puesto que no se manipulan variables ni se interviene sobre los fenómenos analizados, sino que se examinan estudios previamente publicados y para este diseño, la población o datos tomados para el estudio está conformado por los artículos científicos, tesis y documentos técnicos indexados y recuperados en bases de datos académicas como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, SciELO y repositorios institucionales, publicados durante el período comprendido entre 2020 y 2026. La muestra final se delimitó mediante criterios de inclusión que priorizaron documentos en español e inglés, directamente relacionados con IoT, monitoreo de calidad del agua, sensores ambientales, conectividad rural y gestión hídrica en contextos similares al colombiano, mientras que se excluyeron artículos de opinión, documentos duplicados, literatura sin respaldo académico y estudios que no abordaran de manera explícita la temática central y el proceso de búsqueda, depuración y selección de documentos se realizó siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA, con el propósito de garantizar transparencia, trazabilidad y rigor metodológico en la selección del corpus documental.

Como se presenta en la tabla 1 presenta la cadena de búsqueda generales empleadas para identificar los estudios sobre el uso del IoT en el monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales los cuales incluyen trabajos internacionales cuando sea posible experiencias en Latinoamérica y en Colombia, estas cadenas se orientan al problema central de la monografía la aplicación de sistemas IoT de bajo costo con contextos rurales con una brecha digital junto

Tabla 1

Cadenas de Búsqueda: IoT y Calidad del Agua en Zonas Rurales

Subtema	Palabras clave principales	Agrupaciones (ejemplos de cadenas)
IoT y calidad del agua	Internet de las cosas IoT calidad del agua monitoreo del agua áreas rurales sistemas de bajo costo	"Internet de las cosas" o IoT) Y "calidad del agua" Y "monitoreo" Y ("áreas rurales" O "comunidades rurales"
Sistemas IoT de bajo costo	bajo costo Arduino Sensores monitoreo en tiempo real agua inteligente	"bajo costo" Y "monitoreo de calidad del agua" E IoT) O (Arduino Y "sensores de agua" Y "monitoreo en tiempo real"

Subtema	Palabras clave principales	Agrupaciones (ejemplos de cadenas)
Monitoreo en contextos rurales	Abastecimiento de agua rural sistemas de agua comunitarios pequeñas empresas de agua	("abastecimiento de agua rural" Y "IoT" Y "calidad del agua") O ("sistemas de agua comunitarios" Y "monitoreo remoto")
Aplicaciones en América Latina/Colombia	América Latina Colombia; IoT rural gestión inteligente del agua	("IoT" Y "calidad del agua" Y "Latinoamérica" O Colombia)) Y ("rural" O "pequeñas comunidades" O "acueductos comunitarios")

Nota. La tabla organiza cadenas de búsqueda para localizar literatura sobre el internet de las cosas y el monitoreo de calidad de agua en las zonas rurales con un énfasis en sistemas de bajo costo y experiencias en Latinoamérica.

Los datos se observan en la tabla 2 recoge las cadenas de búsqueda orientadas en la dimensión técnica de la revisión: arquitecturas en capas, sensores físicos y químicos, protocolos de comunicación y uso de inteligencia artificial en sistemas IoT para monitoreo de agua. Estas

cadena permiten identificar trabajos que describen el diseño de prototipos con su desempeño y las innovaciones en comunicación y análisis de datos.

Tabla 2

Cadenas de Búsqueda: Arquitectura y Componentes Técnicos de Sistemas IoT para Calidad de Agua.

Subtema	Palabras clave principales	Agrupaciones (ejemplos de cadenas)
Arquitectura IoT en capas	Arquitectura de IoT arquitectura en capas sensores microcontrolador plataforma en la nube panel de control	("Arquitectura IoT" Y "calidad del agua" Y sensores Y microcontrolador Y ("plataforma en la nube" O panel de control))
Sensores de calidad del agua	Sensor de pH sensor de turbidez conductividad TDS Temperatura	("sensor de pH" Y "sensor de turbidez" Y "monitoreo de la calidad del agua" E IoT) O ("sensores de bajo costo" Y "calidad del agua")
Protocolos de comunicación	MQTT	

Subtema	Palabras clave principales	Agrupaciones (ejemplos de cadenas)
	LoRa	(MQTT Y "monitoreo de
	Wi-Fi	calidad del agua" Y IoT) O
	GSM	(LoRa Y "rural" Y "monitoreo
	4G	de agua") O ("IoT satelital" Y
	5G	"agua remota")
	comunicación por satélite	
	telemetría	
Inteligencia artificial y análisis.	aprendizaje automático	
	inteligencia artificial	("aprendizaje automático" Y
	detección de anomalías	"calidad del agua" Y IoT) O
	predicción	("detección de anomalías" Y
	análisis de datos	"sensores IoT" Y "monitoreo del agua")

Nota. Esta Tabla consolida las coordenadas especificadas utilizadas para recuperar estudios sobre el diseño de sistemas IoT, sensores, protocolos de comunicación y uso de analítica avanzada para el monitoreo de la calidad del agua

Tal como se evidencia en la tabla 3 presenta las cadenas de búsqueda enfocadas en el contexto habilitador y las dimensiones éticas políticas e institucionales junto con la

infraestructura digital, desigualdades en conectividad, distribución del agua en zonas rurales y riesgos de privacidad y seguridad en IoT. Estas cadenas permitieron articular la discusión técnica para el análisis de la brecha digital como justicia hídrica y protección de datos.

Tabla 3

Infraestructura Digital, Gobernanza y Privacidad en el Uso del IoT Para el Agua.

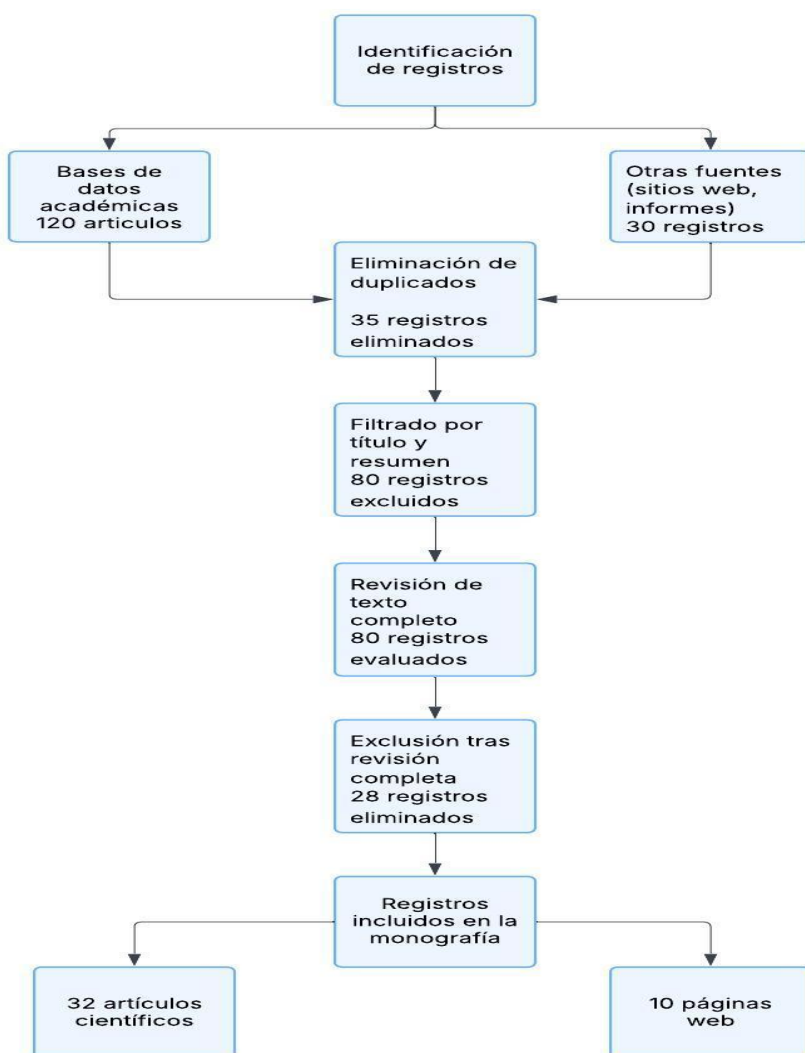
Subtema	Palabras clave principales	Agrupaciones (ejemplos de cadenas)
Brecha digital rural	brecha digital conectividad rural infraestructura TIC Colombia América Latina	("brecha digital" Y "rural" Y ("Colombia" O "América Latina")) Y ("acceso a internet" O "infraestructura TIC")
Infraestructura y políticas TIC	banda ancha conectividad móvil políticas públicas acceso universal telecomunicaciones rurales	("banda ancha" Y "rural" Y "políticas públicas") O ("conectividad móvil" Y "acceso universal" Y ("zonas rurales" O "comunidades remotas")) ("gobernanza del
Gobernanza del agua	Gobernanza del agua justicia hídrica sistemas hídricos rurales	agua" Y "rural" Y ("sistemas de agua comunitarios" O "acueductos comunitarios"))

Subtema	Palabras clave principales	Agrupaciones (ejemplos de cadenas)
	gestión comunitaria del agua	O ("justicia hídrica" Y "Latinoamérica" O Colombia)
Privacidad y seguridad en IoT	privacidad de datos ciberseguridad seguridad del IoT vigilancia protección de datos cuestiones éticas	("privacidad de datos" E IoT Y "monitoreo ambiental") O ("seguridad de IoT" E "ciberseguridad" E "redes de sensores") O ("vigilancia" E "dispositivos de IoT")

Nota. En la tabla reúnen las cadenas utilizadas para identificar los estudios sobre brechas digital como gobernanza del agua y privacidad de los datos vinculados al despliegue de sistemas IoT en contextos rurales, integrando dimensiones técnicas y sociales.

Figura 1

Flujograma PRISMA de la Revisión Documental



Nota. Flujograma correspondiente al proceso de identificación, selección y depuración de 32 artículos científicos y 10 páginas web incluidas en la revisión sistemática. Elaboración propia.

Realidad Hídrica Colombiana y Transformaciones Territoriales Urbanas y Rurales

En Colombia la disponibilidad de calidad y distribución de recursos hídricos se encuentran profundamente condicionadas por transformaciones territoriales ocurridas en las últimas décadas especialmente en la interfaz urbana y rural y estas transformaciones han fragmentado cuencas hidrográficas alterando los ciclos hidro sociales y generando nuevas presiones sobre fuentes de agua superficiales subterráneas y de regiones como en la sabana de Bogotá y en el valle del cauca Bernal y Licona, 2024 señalan que “esta dicotomía no responde a la complejidad de los territorios, sus conflictos socioambientales y transformaciones aceleradas del difuso límite urbano-rural” (p. 2) lo que permite comprender como las diferentes dinámicas territoriales influyen directamente en la distribución del agua.

Las desigualdades en el acceso reflejan que en las coberturas del agua potable cerca del 98% de las áreas urbanas frente a valores alrededor del 65% en áreas rurales, lo que evidencia una brecha estructural en la garantía de los derechos humanos al agua, Como señalan Bernal y Licona (2024), “a 2022, se calculaba una cobertura del acueducto del 98% en zonas urbanas y del 73% en zonas rurales —incluyendo soluciones mejoradas—” (p. 3).En zonas periurbanas se estima que además de cerca del 45% de las fuentes superficiales presentan algún grado de contaminación lo cual se vincula con vertimientos industriales, agrícolas y domésticos sin tratamiento adecuado (Bernal & Licona, 2024).

Entre 1990 y 2020 se ha registrado una pérdida cerca al 35% de suelos permeables en áreas metropolitanas como Bogotá lo que reduce la capacidad de infiltración y aumentando la falta de recursos hídricos en la parte superficial (Bernal & Licona, 2024) de mantener la tendencia actual de urbanización desordenada y de gestión fragmentada de los recursos hídricos, se proyecta Un déficit de agua entre el 35% y 45% hacia el 2050, con impactos

desproporcionado sobre la población rural con menor capacidad de adaptación (Bernal & Licona, 2024). Esta situación hace evidente la necesidad de sistemas de monitoreo más continuos y de bajo costo con una mayor resolución espacial y temporal que superen las limitaciones de los métodos convencionales basados en muestras puntuales y con un análisis de laboratorio.

Figura 2

Zonificación Hidrográfica e Hidrogeológica de Colombia

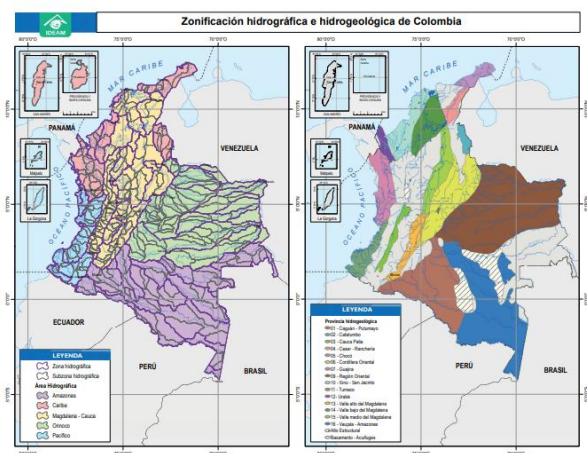


Figura 2. Zonificación hidrográfica e hidrogeológica de Colombia.

Nota. El mapa muestra la distribución de las principales cuencas hidrográficas y regiones hidrogeológicas del país, evidenciando la variabilidad en disponibilidad y presión sobre el recurso hídrico. Tomado de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). Estudio Nacional del Agua 2022: Resumen ejecutivo.

https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/resumen_ejecutivo_estudio_nacional_del_agua_2022_0.pdf

Brecha de Conectividad Digital como Barrera para la Innovación

La posibilidad de implementar sistemas de monitoreo ambiental basados en el internet de las cosas (IoT) en zonas rurales está condicionada por la infraestructura digital disponible y por la magnitud de la brecha de conectividad entre territorios y (DANE–MinTIC, 2023 p,12) sin embargo, estas cifras agregadas ocultan diferencias significativas en cabeceras urbanas la penetración llega al 85% mientras que en áreas rurales alcanza el 48% cómo frente a un sesgo a favor de los hogares de estratos altos (DANE–MinTIC, 2023 p,15).

Como se presenta en la tabla 4 resume algunas de estas brechas de acceso a internet por áreas geográficas y estratos socioeconómicos que inciden directamente a la factibilidad de implementar soluciones IoT en contextos rurales.

Tabla 4

Infraestructura Digital, Gobernanza y Privacidad en el Uso del IoT Para el Agua.

Area/Estrato	Estrato1/2	Estrato3/4	Estrato5/6	Total
Cabecera urbana	68,2	82,5	95,3	85,4
resto urbano	55,1	72,3	88,7	74,2
Rural	32,4	45,6	67,8	48,6
Nacional	50,1	74,8	92,1	72,3

Nota. Se resume brechas de acceso a internet por áreas y estrato socio económico que se ve cómo inciden directamente en la implementación del internet de las cosas en las zonas rurales Datos adaptados de DANE–MinTIC (2023 pp, 15-18). La tabla evidencia brechas significativas de conectividad entre áreas urbanas y rurales, así como entre estratos socioeconómicos.

En cuanto a dispositivos la encuesta indica que la tenencia de computadoras de escritorio o portátiles alcanza el 45,7% de los hogares mientras que los teléfonos inteligentes llegan al 85,4% lo que sugiere que las soluciones de monitoreo deben priorizar interfaces móviles y de comunicaciones óptimas para las redes de los celulares (DANE–MinTIC, 2023 p, 21) la conectividad móvil se sitúa en 58,2% frente a una conectividad fija de 42,1% y en los estratos 1 y 2 el acceso a internet se ve con una reducción del 50,1% muy por debajo del 92,1% observado en los estratos 5 y 6 (DANE–MinTIC, 2023 p,15) los datos observamos que en la infraestructura persisten brechas de uso y habilidades mientras que una alta proporción de usuarios emplea el internet para actividades básicas sólo una fracción menor desarrolla competencias avanzadas en ciberseguridad, programación o análisis de datos lo que conlleva a que se abra una brecha de géneros marcada en habilidades avanzadas 28 mujeres frente a un 42% hombres (DANE–MinTIC, 2023 p,22) en este contexto cualquier proyecto de monitoreo ambiental basado en el internet de las cosas (IoT) de contemplar estrategias para la formación y el acompañamiento y con esto garantizar la apropiación de tecnologías que la innovación reproduzca exclusiones existentes.

Vulnerabilidades en Privacidad y Seguridad de Sistemas IoT

La incorporación de dispositivos IoT a procesos de monitoreo ambiental implica el tratamiento de grandes volúmenes de datos, que pueden incluir no sólo la información física y química sino también la localización patrones de uso y datos directamente vinculados a las comunidades (Coello Márquez 2023) también se advierte que “la masificación de sensores, cámaras, electrodomésticos y sistemas automatizados configura un entorno hiperconectado en el

que se recopila, almacena y procesa de manera continua información sensible de los usuarios” (Coello Márquez, 2023, p. 16).

Entre los riesgos identificados se encuentran la vigilancia permanente no consentida como a la creación de perfiles extremadamente detallados, la exposición a ataques cibernéticos, el espionaje y el acceso no autorizado a datos todo esto facilitado por la ausencia de estándares regulados que sean robustos y por las brechas significativas en la alfabetización digital (Coello Márquez (2023). En el contexto de soluciones IoT para el monitoreo de agua estas vulnerabilidades pueden traducirse en los usos indebidos de datos ambientales y territoriales, Con decisiones unilaterales sobre el acceso a los recursos o discriminación basado en información generada por los sistemas

la literatura sobre inseguridad en el internet de las cosas IoT enfatiza la necesidad de incorporar desde el diseño de medidas como arranque seguro con autenticación dispositivos cifrado de comunicaciones y políticas claras de minimización y recolección de datos (Coello Márquez (2023). Desde una perspectiva ética se requiere garantizar el consentimiento informado como a la transparencia sobre los datos que se recogen se usan junto con la posibilidad de que los usuarios y comunidades ejerzan control sobre la información que les otorgan. Esto resulta especialmente relevante en territorios rurales donde las asimetrías de poder entre las comunidades empresas tecnológicas y entidades estatales pueden ser más pronunciadas.

Crisis Hídrica Ambiental Global y Expresión Local

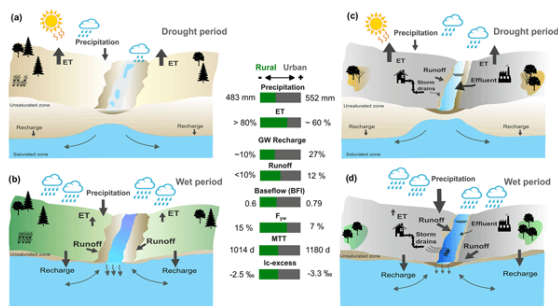
La problemática hídrica colombiana se encuentra escrita en una crisis global enmarcada por el aumento de la temperatura media del planeta y la intensificación de eventos globales climáticos (Chen et al. 2023) Señalan que “el incremento aproximado de 1,1 grados en la escala de temperatura global se asocia al aumento de cerca del 7 % en la intensidad de lluvias fuertes

por cada grado adicional”, lo que genera e incrementa el riesgo de inundaciones graduales y daños a la infraestructura hídrica (p. 01).

En el caso colombiano durante el fenómeno del niño 2015-2016 aproximadamente el 70% de las fuertes lluvias que si monitorearon registraron reducciones críticas en el caudal afectando el abastecimiento para el consumo humano, riego y generación hidroeléctrica (Bernal & Licona, 2024 p.3). De forma paralela Bernal y Licona (2024) destacan que “los periodos de lluvias intensas han provocado desbordamientos de ríos que impactan con especial dureza a comunidades rurales, las cuales dependen de acueductos veredales o fuentes no reguladas” (p. 8) junto con estas dinámicas se suman procesos de deforestación, expansión agroindustrial urbanización informal que degradan humedales, páramos y zonas de recarga, reduciendo la capacidad de regulación natural de los ecosistemas (Bernal & Licona, 2024). En este escenario la disponibilidad de datos ambientales en tiempo casi real se torna crucial para anticipar crisis, dimensionar riesgos y diseñar medidas de adaptación. Los sistemas IoT como los propuestos por Ahmed y Al-Khalidi (2021), Bogdan et al. (2023) y Chen et al. (2023) Muestran que es posible implementar redes de sensores de bajo costo para medir parámetros de calidad y el de agua de manera continúa generando alertas tempranas cuando se superan los umbrales críticos.

Figura 3

Sistema de Monitoreo Continuo de Calidad Hidrica Basado en IoT



Nota. Se observa la disposición de sensores distribuidos en el cuerpo de agua conectados a nodos de transmisión inalámbrica, permitiendo la recolección y envío continuo de datos a una plataforma central Tomado de Di Giuseppe et al. (2024). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 3907–3928. <https://nhess.copernicus.org/articles/24/3907/2024/>

Síntesis de la Problemática y Justificación de la Innovación en IoT

El panorama descrito combina por una parte transformaciones territoriales y desigualdades en el acceso del agua y por otra parte la brecha riesgos de privacidad y los efectos crecientes del cambio climático, los métodos convencionales de monitoreo basados en muestras manuales y análisis de laboratorio resultan costosos, lentos y poco adecuados para la detección temprana de problemas en contextos rurales dispersos (Ahmed & Al-Khalidi, 2021; Alfiya Abubaker et al., 2020).

Las investigaciones sobre el uso de sensores y redes IoT para monitoreo ambiental muestran que la utilización de dispositivos IoT, como sensores y otros dispositivos conectados, permite recopilar datos ambientales en tiempo real para análisis y toma de decisiones más informada, lo cual puede mejorar la eficiencia y reducir costos frente a métodos manuales tradicionales (Ahmad, 2023, p. 37, adaptado de revisión sobre IoT y monitoreo ambiental)

No obstante la opción de estas innovaciones debe contemplar de una manera explícita a las condiciones de infraestructura digital con capacidades locales, Marcos regulatorios y las implicaciones éticas del tratamiento de datos: la brecha de conectividad rural y urbana, la menor tenencia de computadores y la concentración de habilidades digitales avanzadas en determinados grupos sociales sugieren que las soluciones IoT para el monitoreo ambiental en zonas rurales

colombianas deben ser robustas, de bajo costo, de bajo consumo energético, compatibles con dispositivos móviles y acompañadas de procesos de formación y participación comunitaria (DANE–MinTIC, 2023; Coello Márquez, 2023).

La Innovación en la IoT Para el Monitoreo Ambiental se Justifica

En la necesidad de información continua, confiable y localizada para la gestionar la compleja realidad hídrica rural.

La posibilidad de reducir costos y mejorar la precisión y oportunidades de las mediciones mediante soluciones de bajo costo válidas empíricamente y mediante capacitación.

La urgencia de integrar consideraciones de privacidad como la gobernanza del agua y la educación digital en el desempeño e implementación de los sistemas.

Innovaciones en Arquitectura y Tecnología IoT Para el Monitoreo Ambiental en Zonas Rurales

Arquitectura IoT en Capas para el Monitoreo de la Calidad del Agua

La arquitectura de los sistemas de monitoreo de calidad del agua que están basados en el internet de las cosas IoT se organizan habitualmente en un conjunto de capas funcionales que se articulan con la captura de datos, su transmisión, almacenamiento y visualización y en el estudio de la literatura especializada se lograron identificar al menos 3 niveles principales: capa de percepción como los sensores, capa de red o comunicación y capaz de aplicación o servicios a lo que se añaden en algunos casos una capa de procesamiento intermedio (Edge) y una capa de analítica avanzada

en la capa de percepción se integran sensores físicos y químicos destinados a medir parámetros clave en la calidad del agua como el pH, temperatura, turbidez, conductividad eléctrica y de sólidos disueltos totales con estos dispositivos que suelen conectarse a micro controladores de bajo costo como por ejemplo Arduino uno o Arduino mega que se encargan de adquirir señales analógicas o digitales para realizar procesamiento básico como filtrado, escalamiento y conversión para preparar los datos para su transmisión, la capa de red agrupa a módulos de comunicación inalámbrica que se pueden operar sobre tecnologías Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, redes celulares o enlaces satelitales según las condiciones de conectividad del territorio.

En la capa de aplicación se ubican las plataformas en la nube o en servidores locales que reciben los datos los almacenan y los ponen a disposición del usuario técnico y comunitarios mediante interfaces web, aplicaciones móviles o paneles SCADA en estas plataformas permiten configurar umbrales de alerta, generar reportes y en algunos casos activar respuestas automáticas

como el cierre de válvulas o el encendido de bombas ante condiciones anómalas del recurso hídrico; en este enfoque de capas facilita modularidad y escalabilidad de los sistemas lo que permite adoptar componentes específicos cómo tipo de sensor, tecnología de comunicación o plataforma de visualización sin rediseñar por completo la solución propuesta.

Figura 4

Arquitectura Básica de un Dispositivo IoT: Diseño y Componentes Esenciales



Nota. El diagrama ilustra los componentes principales de un dispositivo IoT: sensores, microcontrolador, módulo de comunicación, fuente de energía y plataforma en la nube para procesamiento y visualización Tomado de Eurotronix. (s. f.). Basic architecture of an IoT device – design and essential components. <https://eurotronix.com/en/news/basic-architecture-of-an-iot-device-design-and-essential-components/>

Innovaciones en Protocolos y Tecnologías de Comunicación

La selección de protocolos y medios de comunicación contribuyen a un aspecto crítico para la operación de sistemas IoT en contextos rurales donde la conectividad puede ser limitada, intermitente o poco eficiente en ciertos puntos, en ambientes urbanos opera y urbanos el uso de Wi-Fi y redes celulares 4G o 5G se ha mostrado ser suficiente para transmitir datos de sensores a la plataforma que están en la nube con baja latencia y un alto ancho de banda, sin embargo en

áreas rurales dispersas estas tecnologías pueden no estar tan disponibles o resultar económicamente inviables para comunidades de bajos ingresos.

En respuesta a esas limitaciones se han explorado protocolos ligeros como MQTT (message Queuing Telemetry Transport) Los cuales están diseñados bajo un modelo de publicación y suscripción que reduce el volumen de datos transmitidos y la sobrecarga de señalización lo que lo hace adecuado para redes inestables o de baja capacidad. Así mismo tecnologías de largo alcance y de bajo consumo como LoRa y LoRaWan Permiten establecer enlaces entre nodos sensores y pasarelas (Gateway) ubicadas a varios kilómetros de distancia configurando redes de área amplia de bajo costo y consumo energético que resultan particularmente pertinentes para el monitoreo continuo de los recursos hídricos en las cuencas rurales.

Más recientemente la conectividad satelital IoT se ha posicionado como una alternativa para zonas sin cobertura celular ni fija lo cual permite la posibilidad de transmisión periódica de datos y de sensores ubicados en regiones remotas mediante dispositivos de muy bajo costo y planes de datos optimizados y en el caso colombiano experiencias en el monitoreo agropecuario y de suelos han demostrado que la combinación de sensores de campo con conectividad satelital puede reducir la dependencia de infraestructura terrestre y ampliar la cobertura de redes de monitoreo hacia Orinoquía y la Amazonía.

Sensores Especializados de Bajo Costo para Calidad del Agua

El desarrollo y adopción de sensores de bajo costo ha sido un factor habilitador clave para la expansión de soluciones del internet de las cosas IoT en el monitoreo de la calidad del agua frente a los equipos de laboratorio tradicionales los cuales son costosos voluminosos y poco portátiles se han diseñado prototipos basados en electrodos y transductores comerciales

adaptados a microcontroladores para medir parámetros críticos con precisión aceptables para fines de vigilancia ambiental.

Entre los componentes más utilizados se encuentran sensores de pH con rasgos típicos de medición entre 0 y 14 y presiones del orden es de más o menos 0,1 unidades; los sensores de turbidez capaces de estimar niveles de sólidos en suspensión en unidades de UNT, los sensores de temperatura integrados con resoluciones de décimas de grado en los sensores de conductividad o TDS que aproxima la concentración de sales y sólidos disueltos totales en partes por millón estos dispositivos cuando se ensamblan en módulos IoT permiten construir sistemas cuyo costo total puede situarse en un rango significativamente menor que el de los equipos comerciales equivalentes lo cual es determinante para su adopción por acueductos comunitarios y organizaciones rurales.

En Colombia se han desarrollado prototipos específicos orientados a la medición de conductividad del agua mediante sensores capacitivos interdigitales de muy bajo costo con el propósito de detectar cambios asociados a la contaminación por sólidos disueltos y sales estos desarrollos buscan no sólo abaratar la producción de los sensores sino también facilitar su uso en ríos y quebradas lo que permite a las comunidades que cuenten con una red densa de puntos de observación para que estos datos alimenten plataformas de monitoreo en tiempo casi real.

Integración de Inteligencia Artificial y Analítica Avanzada

más allá de la captura y transmisión de datos una de las innovaciones más relevantes en el sistema IoT para el monitoreo hídrico es la incorporación de técnicas de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje autónomo para análisis y explotación de la información recolectada junto con diversos estudios han demostrado que algoritmos de clasificación y regresión pueden utilizarse para:

calibrar dinámicamente sensores.

Predecir la evolución de parámetros de calidad del agua

identificar patrones anómalos o eventos de contaminación a partir de series temporales

un sistema de calidad del agua se han empleado algoritmos como Naive Bayes, máquinas de soporte vectorial y de redes neuronales para clasificar muestras en categorías como por ejemplo apta(condicionada) o no apta para el consumo a partir de las variables como el pH, turbidez, temperatura y TDS. Asimismo modelos de regresión lineal y no lineal se han utilizado para predecir niveles o caudales en función de variables climáticas e hidrológicas lo que han permitido anticipar escenarios de escasez o desbordamiento además la integración de estos modelos en plataformas IoT convierte a los sistemas en una herramienta de apoyo para la decisión las cuales son capaces de sólo medir el estado actual del recurso sino también ofrecer proyecciones de alertas tempranas.

En el contexto rural la analítica avanzada puede cumplir un papel adicional cómo compensar las limitaciones de infraestructura y recursos mediante esquemas de monitoreo de baja precisión a unos de alta frecuencia donde los sensores relativamente simple generan datos continuos que luego enriquecen mediante algoritmos de filtrado detectando las anomalías y la fusión de fuentes como por ejemplo combinando datos de campo con imágenes satelitales o pronósticos ambientales lo que resulta coherente con la necesidad de soluciones de bajo costo pero con un valor agregado en términos de información para la gestión territorial y comunitaria del agua.

Adaptaciones de Tecnologías para Contextos Rurales Colombianos

Aunque la arquitectura de los componentes descritos ha sido validados en entornos urbanos e industriales su traslado a zonas rurales colombianas exige una adaptación técnica, energética y socio-organizativas, en primer lugar la alimentación eléctrica de los dispositivos de contemplar un esquema de bajo consumo y fuentes renovables principalmente paneles solares y bancos de baterías que garanticen una operación continua e incluso en sitios sin acceso a la red eléctrica la elección de microcontroladores y módulos de comunicación debe tener en cuenta el balance entre consumo alcance y robustez privilegiando diseños que minimicen el mantenimiento y maximice su autonomía.

En segundo lugar la configuración mecánica y ambiental de los sensores debe considerar las condiciones locales como la exposición a radiación solar intensa, lluvias, sedimentación, presencia de biofilm y vandalismo. Esto implica diseñar estructuras de protección mecanismos sencillos de limpieza y procedimientos comunitarios para la inspección periódica de los equipos y con experiencias rurales se ha observado la participación de juntas de acueducto, asociaciones campesinas o guardias ambientales lo que resulta clave para garantizar la sostenibilidad de los sistemas dado que estas organizaciones pueden asumir tareas básicas de operación y mantenimiento cuando cuentan con capacitación adecuada.

Por último la interfaz con las comunidades debe ser clara y accesible en la práctica esto significa desarrollar aplicaciones móviles y paneles de visualización que empleen códigos de colores mensajes simples y alertas entendibles evitando sobrecargar al usuario con tecnicismos. Del mismo modo se recomienda diseñar protocolos de respuesta comunitaria ante alertas como por ejemplo cierre temporal de captaciones, hervido el agua, notificación autoridades

ambientales de este modo que la información generada por los sistemas IoT se traduzca efectivamente en acciones y prevenciones de mitigación de riesgos.

Figura 5

Prototipo de Estación de Monitoreo de Calidad del Agua en Entorno Rural



Nota. Se representa un prototipo de sistema y de implementar un entorno rural compuesto con una caja de sensores para la medición de variables de la calidad del agua con un panel solar para el suministro energético autónomo antena de comunicación inalámbrica para la transmisión de datos y un punto de captación directamente desde la fuente hídrica. Elaboración propia.

Comparación con Sistemas de Monitoreo Convencionales

La literatura reciente coincide en señalar que los sistemas IoT presentan una alternativa técnicamente viable y económicamente más accesible frente a métodos tradicionales de monitoreo de calidad del agua, siempre que se definan claramente sus alcances y limitaciones en contraste mientras los equipos de laboratorio ofrecen una alta precisión y cumplimiento estricto

de normas técnicas su costo de adquisición, operación y mantenimiento, así como la necesidad de personal especializado restringen su uso cotidiano en acueductos rurales y pequeñas comunidades.

Encontraste los sistemas IoT de bajo costo permiten desplegar una red de puntos de medición mucho más densa con datos semi continuos y capacidad de generar alertas automáticas cuando se superan umbrales predefinidos aun cuando la precisión individual de cada sensor pueda ser moderado esta lógica de muchos sensores relativamente baratos frente a pocos equipos muy precisos ha sido explorada en prototipos implementados en contextos rurales de Latinoamérica donde se ha demostrado que para fines de vigilancia y gestión comunitaria como la frecuencia y oportunidad de la información puede resultar más decisiva que las actitud absoluta y cada medición.

Los datos se observan en la tabla 5 sintetiza algunas diferencias clave entre sistemas de monitoreo convencional con respecto a soluciones IoT de bajo costo orientadas a zonas rurales.

Tabla 5

La Comparación General entre Monitoreo Convencional y Soluciones IoT de Bajo Costo para la Calidad del Agua

Característica	Monitoreo convencional (laboratorio)	Soluciones IoT de bajo costo
Frecuencia de datos	Esporádica (campanas puntuales)	Continua o casi continua
Costo inicial	Alto (equipos especializados)	Medio/bajo (sensores y microcontroladores)

Característica	Monitoreo convencional	Soluciones IoT de bajo costo
	(laboratorio)	
Costo operativo	Muy alta	Media- alta (según su calibración)
Requerimiento de expertos	Alto (químicos, técnicos de laboratorio)	Medio (capacitación básica local)
Cobertura espacial	Limitada (pocos puntos de muestreo)	Amplia (múltiples nodos distribuidos)
Tiempo de respuesta	Lento (horas/días)	Amplia (múltiples nodos distribuidos)
Adecuación a zonas rurales	Limitada por costos y logística	Alta, si se adapta a condiciones de energía y conectividad

Nota. Comparación basada en revisión de literatura sobre sistemas de monitoreo hídrico convencionales y prototipos IoT aplicados a contextos rurales.

Resultados Empíricos y Viabilidad Implementación

Resultados Relacionados con la Caracterización del Problema Hídrico y de Conectividad

OE1

los resultados evidencian que en las zonas rurales de Colombia presentan una brecha significativa en el acceso de agua potable y en la conectividad digital las coberturas inferiores frente a las áreas urbanas se identificaron con las siguientes limitaciones que afectan directamente la implementación de sistemas de monitoreo ambiental condicionando la adopción de tecnologías IoT en dichos territorios.

Arquitecturas y Tecnologías IoT OE2

se logró identificar que las arquitecturas IoT en capas junto con el uso de sensores de bajo costo y protocolos de comunicación como LoRa y MQTT Permiten desarrollar sistemas eficientes para el monitoreo de la calidad del agua estos sistemas representan ventajas en términos de escalabilidad, costo y adaptabilidad frente a métodos convencionales.

Validación Técnica y Económica OE3

los resultados muestran que en los sistemas IoT alcanzan niveles de precisión superiores al 90% en condiciones controladas con errores relativos inferiores al 10% en la mayoría de los parámetros con esto se determina que su implementación puede reducir costos hasta en un 50% en comparación con sistemas tradicionales evidenciando su viabilidad técnica y económica en contextos rurales.

Factores de Adopción y sostenibilidad OE4

Se evidenció a qué factores como la infraestructura digital, la seguridad de datos y la educación tecnológica influyen de manera directa en la adopción de soluciones IoT y la falta de

conectividad junto con falta de capacitación limita su implementación mientras que el fortalecimiento de estos facilita su sostenibilidad en comunidades rurales.

Métricas de Desempeño y Precisión del Sistema

la validación de un sistema de monitoreo de calidad del agua basado en IoT exige evaluar rigurosamente su desempeño metrológico frente a métodos convencionales de referencia es decir en diversos desarrollos reportan que bajo condiciones controladas de laboratorio los prototipos IoT alcanzan niveles de precisión superiores al 90% en parámetros como pH temperatura, turbidez y sólidos disueltos totales con tiempos de respuesta del orden de segundos el cual resulta adecuado para aplicaciones de vigilancia continua en acueductos rurales y sistemas de distribución pequeños.

Estos resultados se verifican mediante la comparación de sistemas entre la medida arrojada por el nodo IoT y las obtenidas con equipos que sirven como patrón los cuales están certificados y con esto aplicando procesos de calibración que incluyen inmersión simultánea en ambos dispositivos en soluciones de referencia y la estimación de error relativo promedio y además en investigaciones recientes se han obtenido errores relativos inferiores al 5% para pH, temperatura y conductividad lo que permite cuál considerar el sistema como confiable para la detección de desviaciones relevantes en la calidad del recurso hídrico.

Tal como se evidencia en la tabla 6 presenta un esquema de principales métricas utilizadas en la evolución de desempeño en sistemas IoT de bajo costo para el monitoreo, así como de rangos desempeños reportados en prototipos similares.

Tabla 6*Métricas típicas de desempeño en sistemas IoT para la calidad del agua*

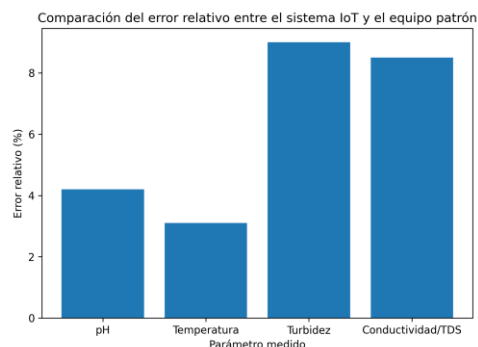
Parámetro	Rango típico de medición	Error reportado*	relativo	Tiempo de respuesta aproximado
Ph	0–14 unidades	< 5%		2–5 segundos
Temperatura	0–50 °C	< 5%		2–3 segundos
Turbidez	0–1000 NTU	8–10%		3–5 segundos
Conductividad / TDS	0–1000 ppm / 0–2000 μ S/cm	8–10%		3–5 segundos

Nota. Se realiza una visualización de los parámetros a medir con sus respectivos margen de error y tiempos de respuesta.

Los valores orientados a partir de prototipos académicos de bajo costo en conjunto estos indicadores muestran un sistema IoT que no alcanzan la precisión de equipos de laboratorio de alta gama pero sus prestaciones son suficientes para la vigilancia y alerta temprana especialmente cuando se privilegia la frecuencia y la continuidad de las mediciones sobre la exactitud absoluta de cada dato individual.

Figura 6

Comparación del Error Relativo entre el Sistema IoT y el Equipo Patrón



Nota. la figura representa un gráfico de barras que compara el error relativo porcentual obtenido por el sistema IoT frente a un equipo patrón para los parámetros pH, temperatura como a turbidez y conductividad lo que evidencia errores relativos inferiores al 5% para pH temperatura y entre el 8 y 10% para turbidez y conductividad los valores considerados son aceptables para aplicaciones de monitoreo de calidad de agua en entornos rurales. Elaboración propia

Pruebas de Campo en Contextos Rurales

Más allá las pruebas de laboratorio la evaluación del sistema IoT en condiciones reales de operación constituye un paso indispensable para determinar su pertenencia en zonas rurales. En experiencias más recientes se ha desplegado prototipos en reservorios, Tanques de almacenamiento y puntos de distribución de acueductos pedales sometidos a autorizaciones de temperatura ambiente, exposición a lluvia, sedimentación y fluctuaciones de caudal propias de estos entornos.

Durante estas pruebas de campos y monitorean parámetros como pH, turbidez, conductividad y temperatura en intervalos regulares como por ejemplo cada 30 o 60 segundos se registran simultáneamente en mediciones con equipos manuales convencionales para contrastar

resultados los datos recolectados muestran que la variación temporal de los parámetros los cuales tienen patrones coherentes con el comportamiento esperado el sistema de distribución y de discrepancias con los valores de referencia se mantienen dentro del margen de error establecidos en la fase de laboratorio.

Además se documentan aspectos operativos como la estabilidad de la conexión la frecuencia de reintentos de envío de datos, la robustez mecánica frente a condiciones climáticas adversas y la facilidad de instalación y retiro del equipo junto con estas observaciones permiten identificar ajustes necesarios para el diseño físico para protecciones de sensores, cajas y soportes en la configuración de los modelos de comunicación para enfrentar las particularidades de los entornos rurales colombianos.

Análisis Económico y Viabilidad Financiera

La viabilidad implementar sistemas IoT en acueductos rurales depende no sólo de su desempeño técnico sino también de su costo total que incluye inversión inicial, operación y mantenimiento los estudios del caso sobre prototipos de bajo costo orientados a contextos rurales contextos de hardware en rango que van desde aproximadamente 480000 pesos hasta alrededor de 1200000 pesos por nodo dependiendo de la calidad de los sensores como el tipo de módulo de comunicación y la inclusión o no de soluciones de energía solar.

Comparados con equipos comerciales de monitoreo continuo de calidad del agua cuyos precios pueden superar con facilidad el 1200000 pesos por punto de emisión estos prototipos logran reducir los costos hasta el 50% sin sacrificar la funcionalidad básica requerida para la vigilancia de parámetros clave a ello se le suma que las plataformas en la nube con planos son gratuitas o de bajo costo así como de software de código abierto para la programación de los

micro controladores y la visualización de datos reduce significativamente los gastos operativos asociados a licencias y mantenimiento de aplicaciones propias.

Desde una perspectiva de costo beneficio la posibilidad de desplegar varios nodos y otro a lo largo de la red de distribución o en diferentes fuentes de captación permite ampliar la cobertura de monitoreo sin incrementar de forma proporcional los costos lo que resulta ventajoso para acueductos comunitarios que gestionan extensas áreas rurales de recursos financieros limitados. Esta capacidad de monitoreo distribuido contribuye a la detección temprana de contaminación y en consecuencia la reducción de costos asociados a enfermedades de origen hídrico interrupciones del servicio y deterioro de la infraestructura.

Consumo Energético y Sostenibilidad del Sistema

Hoy el consumo energético constituye un factor determinante en la implementación de soluciones IoT en zonas rurales dado que muchas de estas áreas carecen de acceso confiable en la red eléctrica o presentan interrupciones frecuentes del servicio en particular los prototipos orientados a este tipo de contexto suelen diseñarse bajo criterios de bajo consumo optimizando el uso de microcontroladores y los módulos de comunicación mediante estrategias como el envío de datos en intervalos confiables y el uso de nodos de suspensión (sleep) entre mediciones.

En general el consumo típico de un nodo IoT equipado con sensores pH, turbidez, temperatura y conductividad junto con el microcontrolador y un módulo de comunicación inalámbrica se sitúan en el orden de ciento de miliamperios en operación activa lo que permite su alimentación mediante pequeños paneles solares y bancos de batería de capacidad moderada. Experiencias de campo muestran que es posible alcanzar autonomías de varios días o semanas sin recarga dependiendo de la frecuencia de transmisión y de condiciones ambientales lo que resulta ser suficiente para la mayoría de los casos de uso en acueductos rurales.

La opción de tecnologías de comunicación de bajo consumo como LoRa o ciertos esquemas de transmisión satelital optimizada contribuyen adicionalmente a reducir las demandas energéticas ampliando la viabilidad de sistemas completamente autónomos en localidades aisladas de esta manera el diseño energético adecuado no sólo favorece la sostenibilidad técnica del sistema, sino que también disminuye los costos operativos asociados al reemplazo frecuente de baterías y la instalación de infraestructura eléctrica adicional.

Figura 7

Balance Energético



Nota. La figura presenta un esquema simplificado del balance energético de un sistema IoT para monitoreo en entornos rurales, en el cual la energía generada por un panel solar es regulada mediante un controlador de carga y almacenada en una batería para alimentar el nodo IoT.

Asimismo se resalta la autonomía estimada del sistema en función de la frecuencia de medición, lo que permite evidenciar la viabilidad del funcionamiento autónomo del dispositivo,

Elaboración propia

Resultados en Calidad del Agua y Generación de Alertas

Uno de los principales aportes de los sistemas IoT es la capacidad de producir información en tiempo real sobre la evolución de la calidad del agua lo que permite identificar tendencias y detectar anomalías de forma temprana en las pruebas de campo descritas y con los nodos instalados en los puntos críticos de la red de distribución registraron series temporales de parámetros físicos y químicos que evidencian variaciones diarias y estacionales asociadas a la demanda del agua a eventos de precipitación y actividades agrícolas o industriales en el lugar de toma de las muestras.

En varios casos de estudio se ha observado que mientras la mayoría de los puntos de monitoreo se mantiene dentro de los rangos normativos establecidos para el agua potable ciertos nodos registran incrementos puntuales de turbidez o TDS que de no ser detectados podrían pasar inadvertidos hasta manifestación posibles problemas visibles o quejas de los usuarios con la configuración de umbrales de alerta en la plataforma IoT permite que cuando los valores superen los límites establecidos se generen notificaciones automáticas a los usuarios con una configuración de umbrales de alerta en la plataforma IoT y con estos datos permiten que cuando los valores superen los límites establecidos generen notificaciones automáticas a los responsables del acueducto o a las autoridades locales facilitando respuestas oportunas como el ajuste de dosificaciones, limpieza de los tanques o la emisión de recomendaciones a la comunidad.

Además de las acumulaciones de datos históricos posibilita la construcción de base de datos que pueden emplearse posteriormente para el desarrollo de modelos predictivos, orientados a anticipar deterioros en la calidad del agua y planificar intervenciones preventivas. De este modo los sistemas de monitoreo no sólo cumplen una función de vigilancia sino se convierten en

soporte para la toma de decisiones estratégicas en materia de gestión de recursos hídricos en las zonas rurales.

Transferencia Tecnológica y Potencial de Escalamiento

la validación técnica y económica de prototipos IoT Para monitoreo de calidad de agua constituye un primer paso hacia su adaptación a mayor escala, sin embargo la consolidación de estas soluciones como herramienta de uso habituales en acueducto rurales requiere procesos de transferencia tecnológica planificados y la implementación de diferentes proyectos y experiencias han demostrado la participación de universidades, centro de investigaciones, empresas de base tecnológica y organizaciones comunitarias es clave para diseñar estrategias de transferencia que incluyen formación y acompañamiento y aplicación de los sistemas a realidades locales.

Entre los elementos críticos de estos procesos se encuentran:

Elementos Críticos de Procesos se Encuentran

elaboración de manuales de instalación, operación y mantenimiento accesible.
Realización de talleres de capacitación para personal técnico y comunitario
la definición de esquemas de soporte y actualización de software y hardware
asimismo se deben explorar modelos de financiación que combinen recursos públicos, cooperación internacional y aportes de los propios usuarios de manera de que los costos de adquisición y renovación sean sostenibles en el tiempo para las comunidades rurales con capacidades económicas limitadas.

En cuanto al escalamiento modularidad de las arquitecturas IoT permiten incrementar progresivamente el número de nodos desplegados, integrar nuevos tipos de sensores por ejemplo de cloro residual o niveles de tanque y conectar los sistemas locales a plataformas regionales o

nacionales de información hídrica y en este enfoque favorecerá construcción de redes de monitoreo multiescala en donde los datos generados por acueductos comunitarios contribuyen a una compensación más fina de la situación de los recursos hídricos del país a la vez que regresan a las comunidades de forma de información útil para la gestión cotidiana.

En síntesis los resultados empíricos disponibles muestran que las sistemas IoT de bajo costo pueden alcanzar niveles satisfactorios de precisión y confiabilidad autónoma y energética con costos compatibles con las realidades de los acueductos rurales la clave para su consolidación radica en articular estos avances técnicos con estrategias de formación con financiación y gobernanza que facilitan su apropiación por parte de las comunidades y su integración en marcos institucionales de vigilancia de calidad del agua.

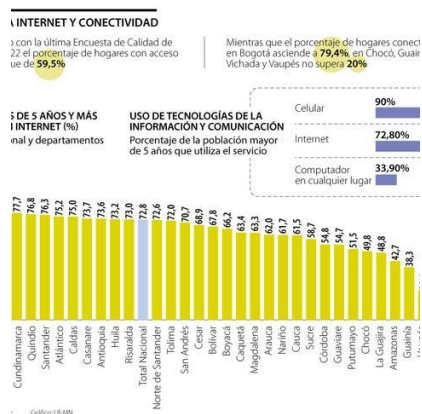
Factores Habilitadores y Sostenibilidad Sistemática para la Adopción de IoT en Zonas Rurales Colombianas

Infraestructura Digital y Condiciones Estructurales de Conectividad

la adopción sostenible para dar soluciones al monitoreo ambiental basado en IoT en zonas rurales colombianas dependen de manera directa de la infraestructura digital disponible y en las condiciones estructurales de conectividad con los datos más recientes sobre el acceso a internet en el país muestran una cobertura nacional cercana al 72.3% con un incremento de más de 6 puntos porcentuales frente al año anterior y Según las estadísticas oficiales más recientes del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE 2024), “en 2024, 65,6 % del total nacional de hogares poseían conexión a internet” (p. 7) esta cifra se distribuye de forma profundamente desigual entre cabeceras urbanas, centros poblados y áreas rurales donde la penetración apenas alcanza el 48.6% frente a valores d 85.4% en zonas urbanas consolidadas (DANE–MinTIC, 2023)con estas brechas se acentúan cuando se observa el acceso por estratos socio económico mientras que los hogares de estratos 5 y 6 alcanzan niveles de conectividad cercanos al 92,1% los hogares de 1 y 2 apenas llegan al 5.1% lo que evidencia una desigualdad estructurar en la posibilidad de participar en ecosistemas digitales y por conexión con beneficios de soluciones de monitoreo ambiental sustentado en tecnologías conectadas (DANE–MinTIC, 2023) a estos datos se le suma un bajo de nivel de posición de computadoras de 45,7% compensado parcialmente por una alto uso de teléfonos inteligentes con un 85,4% a lo que sugiere que las soluciones IoT deben diseñarse priorizando interfaces móviles y comunicaciones optimizadas para redes celulares antes de que dependan de equipos de escritorio o portátiles de mayor costo.

Figura 8

Brecha de Acceso a Internet en Colombia Según Región



Nota. La figura presenta un gráfico de barras que evidencia la brecha de acceso digital en Colombia, mostrando diferencias significativas entre los hogares de estratos 1 y 2 y los de estratos 5 y 6 en términos de conectividad a internet con esto se puede observar un menor nivel de posesión de computadores frente a una alta penetración de teléfonos inteligentes, lo que condiciona la adopción de soluciones IoT y resalta la necesidad de priorizar interfaces móviles y comunicaciones basadas en redes celulares Tomado de La República. (2023). <https://www.larepublica.co/internet-economy/en-colombia-72-8-de-la-poblacion-usa-internet-pero-en-vichada-solo-la-usa-12-7-3623833>

Barreras de Conectividad para Zonas Rurales Dispersas

Más allá de los indicadores agregados en los territorios rurales dispersos se combinan múltiples barreras que limitan la adopción de sistemas para el monitoreo de calidad del agua entre ellos destacan:

Ausencia de infraestructura de telecomunicaciones en veredas y corregimientos alejados.

Los costos relativamente altos de los datos móviles en relación con los ingresos promedios de los hogares colombianos

falta de programas sostenidos de apoyo estatal para la conectividad comunitaria (DANE–MinTIC, 2023).

En la práctica estas barreras se traducen en interrupciones frecuentes del servicio en zonas de sombra sin señal en la que imposibilita el mantener una transmisión continua de datos desde los nodos de monitoreo hacia las plataformas en la nube y cómo se discutió anteriormente si bien las tecnologías como MQTT, LoRa o la conectividad satelital pueden mitigar parcialmente estas limitaciones técnicas, su adopción requiere inversiones iniciales y capacidades técnicas que no siempre están presentes en las organizaciones rurales, esta situación plantea la necesidad de pensar en diseños y vídeos que combinen almacenamiento local de datos y transmisión diferida así como el uso de redes comunitarias y soluciones de conectividad compartida para disminuir costos y aumentar la resiliencia del sistema.

Privacidad Seguridad de Datos y Marcos Regulatorios IoT

La dimensión tecnológica de la opción IoT en contextos rurales no pueden analizarse de forma separada de las implicaciones éticas jurídicas y políticas que conlleva el tratamiento intensivo de datos Coello Márquez (2023) Subraya que el despliegue masivo de dispositivos conectados ha generado “ un mundo globalizado e hiperconectado, es necesario analizar e identificar los riesgos y desafíos asociados que puedan existir con la recolección, procesamiento y almacenamiento de datos personales que se generan mediante el uso de los dispositivos IoT” (p. 3). En un entorno de vigilancia potencialmente permanente en el que se recopilan datos de usuarios, hogares y territorios sin que existan siempre mecanismos claros de consentimiento informado, gestión de riesgos y control ciudadano.

En este contexto los sistemas IoT para monitoreo ambiental pueden implicar la recolección de información sostenible sobre la disponibilidad y calidad del agua en comunidades específicas, datos que se podrían ser utilizados para tomar decisiones unilateralmente sobre asignación de recursos, priorización de inversores o control de usos sin la participación de actores directamente afectados Coello Márquez (2023), la ausencia de estándares robustos de seguridad suma a vulnerabilidades de protocolos inalámbricos y falta de normativas específicas sobre IoT, incrementa el riesgo de accesos no autorizados, ciberataques, espionaje y uso indiscriminado de la información.

Frente a ellos se vuelve indispensable incorporar desde el diseño de los sistemas, principios de privacidad del diseño y seguridad por defecto. Definiendo políticas claras sobre qué datos se recolectan con qué finalidad durante cuánto tiempo y en qué condiciones pueden ser compartidos con terceros Coello Márquez (2023) plantea hoy además la necesidad de complementar la regulación de procesos de educación de usuarios y comunidades de manera que puedan comprender las implicaciones del uso de tecnologías IoT y ejercer un control efectivo sobre dispositivos y plataformas que operan en su territorio.

Gobernanza del Agua, Justicia Hídrica y Articulación Institucional

En cuanto a el despliegue de soluciones IoT para el monitoreo de la calidad del agua se inscribe en un campo de tensiones más amplio relativo a la gobernanza del agua ya que múltiples visiones sobre su condición de bien común, recurso económico y derecho fundamental. Bernal y Licona (2024) argumentan “Los estudios de ecología política, justicia hídrica y territorios hidro sociales ilustran conflictos relacionados con la gestión del agua y también cuestionan la dicotomía urbano-rural” (p. 11) Asimismo, los autores explican que estas perspectivas: “reivindican otras formas de comprensión del mundo más ajustadas a las tradiciones históricas y

los constructos socioculturales de las comunidades desde sus formas de vida y su relación con la naturaleza” (Bernal & Licona, 2024, p. 11)

Este escenario incorpora tecnologías de monitoreo que puede reforzar tanto dinámicas de centralización y control tecnocrático como procesos de democratización de la información y empoderamiento comunitaria, dependiendo de cómo se diseñan los arreglos de gobernanza si los datos producidos por los sistemas IoT se centran exclusivamente en entidades estatales o en empresas privadas sin mecanismos de devolución y participación y si existe el riesgo de que las comunidades rurales se han reducidas junto con las fuentes de información sin voz en las decisiones sobre el uso, asignación y protección del recurso.

Por el contrario cuando los acueductos comunitarios las organizaciones campesinas y otras instancias territoriales tienen acceso directo a los datos, participé en la definición de indicadores relevantes y en la interpretación de la información, los sistemas de monitoreo pueden fortalecerse como instrumentos de Vigilancia social de derechos y de negociación con instituciones estatales y actores privados (Bernal y Licona, 2024) En coherencia con ello, los autores destacan que:

“La comprensión del agua como flujo o corriente, y su discurrir por el paisaje como elemento esencial para la vida humana y natural, enriquece el enfoque territorial, haciendo evidente la conexión urbano-rural a través de los cursos del agua” (p. 11)

en este sentido la justicia hídrica entendía cómo el acceso equitativo y la participación efectiva y el reconocimiento de saberes locales constituye un marco normativo y clave política para evaluar el impacto de la digitalización y de la sensorización del territorio sobre las relaciones de poder en torno al agua

Figura 9

Diagrama de Actores Involucrados en el Monitoreo de la Calidad del Agua Mediante Sistemas IoT



Figura X. Brecha de acceso digital en Colombia según estrato socioeconómico y tipo de dispositivo.

Nota. La figura presenta un gráfico de barras que evidencia la brecha de acceso digital en Colombia, mostrando diferencias significativas entre los hogares de estratos 1 y 2 y los de estratos 5 y 6 en términos de conectividad a internet. Asimismo, se observa un menor nivel de posesión de computadores frente a una alta penetración de teléfonos inteligentes.

Nota. La figura representa la interacción entre comunidades, acueductos rurales, autoridades ambientales, empresas tecnológicas y la academia en torno a los datos generados por sistemas IoT para el monitoreo de la calidad del agua y el diagrama evidencia el flujo de información y la articulación institucional necesaria para la gestión, análisis y uso de los datos, así como para la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad del recurso hídrico en entornos rurales.

Elaboración propia

Educación Digital, Apropiación de Tecnologías y Capacidades Locales

La sostenibilidad de los sistemas IoT en zonas rurales están estrechamente ligadas a los procesos de educación digital y de construcción de capacidades locales además los datos sobre las brechas de habilidades digitales particularmente en competencias avanzadas y con evidentes diferencias de género muestran que una parte importante de la población no cuenta con conocimientos necesarios para comprender el funcionamiento básico de las tecnologías conectadas, evaluar sus riesgos ni aprovechar plenamente su potencial (DANE–MinTIC, 2023).

En este contexto Chen et al (2023) destaca la importancia de interfaces pedagógicas que no sólo muestren datos técnicos sino que también contribuyen a procesos de educación ecológica y sensibilización sobre la importancia de la protección de los recursos hídricos y la implementación de aplicaciones móviles, paneles de visualización y sistemas de alerta pueden dañarse como herramienta didáctica para estudiantes, usuarios de acueductos líderes comunitarios favoreciendo la apropiación social de la información y el desarrollo de una cultura de monitoreo y prevención.

La apropiación de tecnología implica además que los actores locales participen activamente en la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas lo que requiere programas de formación que combinen contenidos técnicos como sensores, comunicaciones y energía con elementos de ética digital, seguridad de datos y gobernanza del agua Coello Márquez, 2023; Bernal & Licon, 2024 En relación con la necesidad de superar enfoques centralizados y fortalecer la participación territorial, Bernal y Licon (2024) advierten sobre: “la tradicional acción ‘de arriba hacia abajo’ de los Estados, sin dar espacio a la participación y al protagonismo de los propios actores territoriales” (p. 11).

De esta forma se busca evitar escenarios en que las comunidades queden dependientes de proveedores externos para tareas básicas de operación reduciendo la vulnerabilidad frente a fallas, obsolescencia o cambios contractuales.

Recomendaciones para Política Pública y Sostenibilidad de la Innovación

el análisis del contexto habilitador para la opción de IoT en monitoreo de calidad del agua en zonas rurales colombianas permite formular un conjunto de recomendaciones orientadas a fortalecer la sostenibilidad de estas innovaciones desde una perspectiva integral y en primer lugar, resulta indispensable que las políticas públicas de colectividad y transformación digital

incorporen explícitamente las necesidades de los acueductos rurales de las comunidades campesinas, destinando 2 recursos específicos para la infraestructura de telecomunicaciones energía y soporte técnico en territorios históricamente marginados (DANE–MinTIC, 2023)

En segundo lugar se requiere avanzar en la construcción de Marcos regulatorios claros sobre el uso del IoT y el tratamiento de datos en el ámbito ambiental con incluyendo estándares de seguridad, protocolos y mecanismos de responsabilidad compartida entre ellos proveedores tecnológicos, entidades públicas y organizaciones comunitarias (Coello Márquez, 2023). Estos Marcos deben alinearse con principios de justicia hídrica en este sentido, Bernal y Licona (2024) señalan que:

“Los estudios de ecología política, justicia hídrica y territorios hidro sociales ilustran conflictos relacionados con la gestión del agua y también cuestionan la dicotomía urbano-rural” (p. 11).

Asimismo, advierten que persisten barreras estructurales derivadas de enfoques institucionales tradicionales, como:

“la tradicional acción ‘de arriba hacia abajo’ de los Estados, sin dar espacio a la participación y al protagonismo de los propios actores territoriales” (Fernández et al., 2019, como se cita en Bernal & Licona, 2024, p. 11).

En tercer lugar, es recomendable impulsar programas de investigación aplicada y proyectos piloto que articulen universidades, centros de innovación, empresas de base tecnológica y organizaciones rurales, orientados al desarrollo de prototipos IoT de bajo costo adaptados a las condiciones de distintas regiones del país, y acompañados de estrategias de transferencia tecnológica y evaluación participativa (Chen et al., 2023). Estos programas pueden servir como laboratorios vivos para probar arquitecturas, modelos de gobernanza y esquemas de

financiación, generando evidencia que alimente la formulación de políticas públicas más informadas.

Por último la sostenibilidad sistémica de estas innovaciones requiere entender los sistemas de monitoreo no solo como dispositivos técnicos aislados, sino como parte de un entramado sociotécnico que incluye normas, actores, infraestructuras y culturas en coherencia con ello, Bernal y Licona (2024) destacan que:

“La comprensión del agua como flujo o corriente, y su discurrir por el paisaje como elemento esencial para la vida humana y natural, enriquece el enfoque territorial, haciendo evidente la conexión urbano-rural a través de los cursos del agua” (p. 11)

En este sentido las recomendaciones deben orientarse a construir capacidades institucionales y comunitarias, a fortalecer la participación y el control social sobre los datos, ya consolidar la idea del agua como bien común cuya gestión, incluso cuando se apoya en tecnologías digitales, debe regirse por principios de equidad, transparencia y responsabilidad intergeneracional (Bernal & Licona, 2024; Coello Márquez, 2023; Chen et al., 2023).

Discusión

El estudio desarrollado en este documento evidencia como se incorporan soluciones basadas en el internet de las cosas IoT para el monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales de Colombia así se encuentra en el punto de encuentro entre los cambios tecnológicos globales y problemas locales de acceso a el agua de igual manera que ocurre con otros procesos de digitalización sectorial la opción de sistemas IoT no se distribuye de manera equitativa mientras que en ciudades y en países que tienen una capacidad tecnológica su implementación avanza con rápidamente , en territorios rurales de Colombia existen desafíos asociados a brechas de infraestructura, financiamiento y capacidad humana por lo que condicionan la posibilidad de aprovechar al máximo estas innovaciones.

Se presenta un hallazgo central en que los sistemas IoT de bajo costo integrados por sensores como los de pH, turbidez, temperatura y de sólidos disueltos totales, los cuales van conectados a micro controladores y plataformas en la nube pueden alcanzar niveles de precisión y tiempos de respuesta suficientes para funciones de vigilancia continua y generación de alertas tempranas, siempre que se apliquen los protocolos adecuados de calibración y validación frente a equipos de referencia, no obstante la revisión muestra que estos buenos resultados dependen en gran medida de la calidad de los componentes del diseño y arquitectura de el diseño además incluye estrategias de energía y comunicación por lo que no es posible asumir una transferencia directa de prototipos desarrollados en otros países sin procesos de adaptación a entornos locales, con estos datos observamos que las áreas rurales la falta de internet es un gran obstáculo para implementar soluciones de monitoreo, los datos disponibles indican diferencias significativas en el acceso a internet entre áreas urbanas y las áreas rurales así como entre diferentes grupos socioeconómicos lo cual hace que sea difícil de implementar los esquemas de monitoreo que

dependen de conexión a internet permanente ya con estas observaciones se necesitan a considerar arquitecturas híbridas que combinan almacenamiento de datos local, transmisiones periódicas y tecnologías de comunicación de bajo consumo a la vez que pone de manifiesto la necesidad de políticas públicas orientadas a mejorar la infraestructura TIC En territorios rurales y donde se permita la implementación efectiva de soluciones de monitoreo.

Otro aspecto crítico e importante que se logró identificar es la dimensión ética y política asociada a la gestión de datos generados por sistemas IoT; la literatura revisada advierte sobre riesgos de vigilancia sin consentimientos, usos secundarios de la información y vulnerabilidad en ciberseguridad estos riesgos pueden afectar tanto a individuos como a comunidades especialmente cuando se trata de datos ambientales y territoriales vinculados a recursos estratégicos como el agua Por lo tanto la consecuencia se reconoce que la implementación de estas tecnologías debe ir acompañada de marco de protección de datos, reglas claras de gobernanza y mecanismos de participación que permitan a las comunidades comprender, discutir y decidir sobre el uso de la información producida en sus territorios.

La revisión también destaca la importancia del papel de la gobernanza del agua y de la justicia hídrica como marcos interpretativos clave para entender implicaciones de sensorización y digitalización del recurso; cuando las comunidades, acueductos comunitarios y organizaciones locales participan activamente en el diseño, operación e interpretación del sistema y monitoreo, las tecnologías IoT tienden a convertirse en una herramienta de empoderamiento y exigibilidad de derechos, sin embargo cuando son gestionadas exclusivamente por actores externos existe el riesgo de reforzarás asimetrías del poder y reproducir formas de invisibilizarían de los saberes y prioridades de las comunidades rurales.

La discusión sobre potencial transformador de soluciones IoT para el monitoreo de la calidad del agua en zonas rurales colombianas muestra que hay un gran potencial para hacer cambios importantes pero depende de la capacidad de dimensionar articulaciones técnicas sociales e institucionales con un enfoque integral pero con la integración de la tecnología por sí sola no garantiza mejoras en el acceso al agua ni la equidad territorial, su impacto efectivamente requiere inversiones en infraestructura, formación de talento humano, marcos de protección de datos y esquemas de gobernanza colaborativa que involucren a instituciones públicas, comunidades, academias y sector privado en este sentido la automatización el monitoreo de el agua no es un fin en sí mismo sino una parte de estrategias más amplias para gestionar el agua, Desarrollar el campo y lograr justicia ambiental lo cual es importante entender que el monitoreo es sólo un componente de un plan más grande que buscan mejorar la calidad de vida de las comunidades y en las personas que no gozan de un tratamiento de agua digno como en las zonas urbanas.

Conclusiones

La revisión permitió demostrar que el acceso al agua segura en las zonas rurales de Colombia sigue condicionado por unas brechas estructurales y de infraestructura hídrica con conectividad digital lo que permite y allí y permite la limitación de la oportunidad y continuidad del monitoreo ambiental lo que genera en este sentido que el problema no se reduce a la calidad del recurso sino también a la desigualdad territorial que afecta la capacidad de vigilancia colágeno y respuesta de las comunidades rurales.

Se evidenció que las soluciones IoT de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua integran sensores de pH, turbidez, temperatura y sólidos disueltos totales hoy lo cual junto con micro controladores, Protocolos de comunicación y plataformas de visualización que permite un seguimiento continuo y estas arquitecturas muestran que la tecnología puede adaptarse a contextos rurales siempre y cuando se diseñe con criterios de modularidad de bajo consumo y compatibilidad con las condiciones locales.

La literatura revisada confirmó que los sistemas IoT pueden alcanzar niveles de precisión y tiempos de respuesta adecuados para la vigilancia y generación de alertas tempranas con una gran ventaja frente a métodos convencionales en frecuencia de medición, cobertura espacial y con una gran reducción de costos operativos por su viabilidad depende de procesos adecuados de calibración, validación ir a votación a particularidades de cada territorio.

De acuerdo a la investigación se concluyó que la adopción sostenible de estas tecnologías no depende sólo es su desempeño técnico sino también de la infraestructura digital, protección de datos, gobernanza del agua y la formación de capacidades locales lo cual la implementación de IoT en zonas rurales debe entenderse como un proceso socioeconómico socio técnico que

requiere articulación entre comunidades, instituciones y actores tecnológicos para garantizar la equidad, apropiación y sostenibilidad.

Recomendaciones

Fortalecer la infraestructura digital y telecomunicaciones en zonas rurales priorizando esquemas de conectividad móvil, enlaces de bajo costo y soluciones híbridas que faciliten transmisión continua o diferida de datos de sistemas IoT de monitoreo de calidad del agua.

Diseñar e implementar programas de formación y acompañamiento dirigidos a acueductos y organizaciones rurales que incluyen operaciones básicas de sistemas IoT lectura de datos, mantenimiento preventivo, ética digital y protección de la información

desarrollar marcos normativos específicos para el uso de IoT en el ámbito ambiental como que regulan la privacidad, seguridad y propiedad de los datos incorporando principios de justicia hídrica participación comunitaria y transparencia en el acceso y uso de la información generada.

Promover proyectos piloto de con diseños y transferencia tecnológica entre universidades, centros de investigación, empresas de tecnología, Entidades públicas y comunidades rurales con evaluación participativa de resultados técnicos sociales y ambientales.

Integrar sistemas y de monitoreo de la calidad del agua en estrategias más amplias de gestión territorial y adaptación al cambio climático, articulando la información generada con instrumentos de planificación, alerta temprana y toma de decisiones a nivel local, regional y nacional.

Referencias Bibliográficas

- Abubaker, A., Kavya, C. R., Thomas, T., Joseph, N., & Begum, S. (2020). A study on IoT approach for monitoring water quality using MQTT algorithm. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(5), 1234–1239.
- Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present and future. (2022). *Agricultural Systems*, 199, 103407. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103407>
- Ahmed, F., Bijoy, M. H. I., Hemal, H. R., & Noori, S. R. H. (2024). Análisis inteligente de la acuicultura: Mejora del cultivo de camarón en Bangladesh mediante la monitorización de IoT en tiempo real y el análisis predictivo de aprendizaje automático. *Heliyon*, 10(17), e37330. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37330>
- Ahmed, S. S., & Al-Khalidi, A. (2021). Water quality monitoring system: A smart city application with IoT innovation. En *2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ESCI50559.2021.9396974>
- Alayón Domínguez, J., Corona Ferreira, A., Custodio Izquierdo, C. A., & González Zacarías, C. (2025). Sistema IoT LoRaWAN-ChirpStack-Grafana para monitoreo remoto de pozos petroleros: Estudio de caso en Tabasco, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 1234–1256. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.9456
- Arango Trillos, J. E., Ramírez Orellano, L. O., Navarro Pino, D., & Rincón Pinzón, M. A. (2023). Prototipo IoT para monitorear variables agroambientales determinantes en la productividad de fincas agropecuarias. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(42), 87–94. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i42.2708>

- Bernal, A. Y., & Licona, W. M. (2024). Transformaciones en el espacio urbano-rural en Colombia y su impacto en el suministro de agua. *Territorios*, (50).
- 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), Article 3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>
- Camargo, L., Medina, B., & Gómez, J. (2022). Prototipo electrónico IoT para el seguimiento de variables ambientales. *Revista Ambiental Agua Aire y Suelo*, 13(2), Article 112.
- Chen, S.-L., Chou, H.-S., Huang, C.-H., Chen, C.-Y., Li, L.-Y., Huang, C.-H., Chen, Y.-Y., Tang, J.-H., Chang, W.-H., & Huang, J.-S. (2023). An intelligent water monitoring IoT system for ecological environment and smart cities. *Sensors*, 23(20), Article 8540. <https://doi.org/10.3390/s23208540>
- Coello, M. V. (2023). Análisis de la privacidad de los datos de los usuarios, en el contexto del internet de las cosas [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio Institucional UTB.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2022). Encuesta de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Hogares (ENTIC).
- Duque, J. A. G. (2023). El internet de las cosas (IoT), la ciudad inteligente (smartcity) y el medio ambiente. En *Actas de las V Jornadas ScienCity 2022* (pp. 58–61). Universidad de Huelva.
- Falero, E. R. (2020). Gestión y conciencia ambientales en el distrito de Ancón, 2020.
- FAO. (2021). Tecnologías digitales en la agricultura y las zonas rurales: Una oportunidad para la transformación rural.

- Ferreira, J. C. V., Higuera, M. F. C., & Barrera, J. A. V. (2021). Nuevos desafíos en el desarrollo de soluciones para e-health en Colombia, soportados en Internet de las Cosas (IoT). *Revista EIA*, 18(36).
- Flores-Cortez, O. O., & Hernández, J. (2024). Implementación de una red de monitoreo de la calidad del aire utilizando tecnologías IoT de bajo costo, caso de estudio El Salvador. *South Florida Journal of Development*, 5(3), 9876–9890.
<https://doi.org/10.46932/sfjdv5n3-056>
- Glória, A., Segura, P., Corcoba, V., & García, A. (2020). Water management for sustainable irrigation systems using Internet-of-Things. *Sensors*, 20(6), Article 1710.
<https://doi.org/10.3390/s20061710>
- Gutiérrez-Lopera, J. E., Toloza-Rangel, J. A., Soto-Vergel, Á., López-Bustamante, O., & Guevara-Ibarra, D. (2021). Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 137–150. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-20210012>
- Haase, T. (2022). IoT para la sensorización ambiental de dependencias de la ULL [Trabajo de fin de grado, Universidad de La Laguna].
- Hernández, E., Martínez, A., Schalm, O., González, R. A., & Hernández, L. (2023). Diseño de un sistema de medición y monitoreo de variables asociadas a calidad del aire. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 44(2), 35–44.
- Huang, Y. P., & Khabusi, S. P. (2025). Artificial Intelligence of Things (AIoT) advances in aquaculture: A review. *Processes*, 13(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/pr13010073>

- IoT Analytics. (2024). State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 16% to 17.5 billion globally.
- Macias, B. L. C., & Gaibor, R. (2023). Agricultura familiar en el desarrollo rural sostenible de la comunidad La Guayaquil, Cantón Balzar. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 1079–1097. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8745
- Méndez, J. O. M. (2020). Los retos del acceso a agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (49), 28–37. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.5>
- Montilla, J. A. (2023). Incidencia del Internet de las Cosas (IoT) en el sector agropecuario colombiano [Tesis, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].
- Mosquera, L. M., & Cevallos, C. D. (2022). *Diseño e implementación de un prototipo IoT para el monitoreo de parámetros ambientales aplicados al cultivo de arroz utilizando ESP32 y Thingspeak* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
- Núñez-Agurto, D., Benavides-Astudillo, E., Rodríguez, G., & Salazar, D. (2020). Propuesta de una plataforma de bajo costo basada en Internet de las Cosas para agricultura inteligente. *Revista Politécnica*, 46(2), 47–56. <https://doi.org/10.33333/rp.vol46n2.05>
- Pores, J. D., & Cortés, J. C. (2024). *Sistema de monitoreo y control a distancia por medio de una red LoRaWAN en el marco de internet de las cosas para aplicaciones académicas* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
- Ramírez-González, G., et al. (2023). IoT for monitoring environmental conditions of the Páramo ecosystem in Colombia. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 12(2), Article 28. <https://doi.org/10.3390/jsan12020028>

- Riquelme, L., & Antonio, J. (2021). *Contribución a las redes de sensores inalámbricas: Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión* [Tesis de máster, Universidad Politécnica de Valencia].
- Rodríguez, H. (2024). *Transformación digital en zonas rurales*.
- Salgado Villanueva, W. E., Bacigalupo Chocano, G. E. D., Acostupa Godoy, F. J., Córdova Miranda, T. L., & Rivera Herrera, H. J. (2025). Desarrollo de una estación IoT para monitoreo de microclimas y condiciones de suelo para adaptación de cultivos al cambio climático. *Ingeniería Investiga*, 7(1), 45–60.
- The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review. (2025). *Sensors*.
- Vallejo-Sánchez, D., Muñoz-García, A., Chaverra-Zuleta, E., Correa-Casas, J., Londoño, L. F., & Bustamante-Rúa, O. (2024). Desarrollo de una arquitectura IoT para monitoreo ambiental: Integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. *DYNA*, 91(231), 163–168.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v91n231.112093>