

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Propuesta de Tecnologías de Medición para el Control de Consumos de
Agua Potable en Edificios Nuevos de la Ciudad de Guayaquil

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**Máster en Ingeniería Civil mención Construcción y
Saneamiento.**

Presentado por:

José Fabricio Cabrera Toro

Hugo Fabian Romero Loayza

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

A Dios, mis padres, mi familia y mi novia, por su amor, paciencia y apoyo constante. Gracias por inspirarme a ser mejor persona y un gran profesional.

José F. Cabrera T.

Dedico este trabajo a Dios, mis padres, hermanos, abuelita, familia y a mi novia, por su paciencia y motivación constante para lograr ser una mejor persona y un mejor profesional.

Hugo F. Romero L.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la fortaleza espiritual brindada en cada paso; a mi familia y mi novia, por su amor y apoyo incondicional; a mi compañero de investigación, por su colaboración y compromiso; a nuestro director de tesis, Msc. Jeffrey Barberán, por su guía académica; a Veolia, por su aporte técnico, y al PhD. Juan Núñez, por sus valiosos consejos y asistencia desinteresada, que enriquecieron nuestro enfoque de investigación. Cada uno ha contribuido a la culminación de esta meta.

José F. Cabrera T.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por hacer esta meta posible. A mis padres, hermanos y familia por su apoyo incondicional. A mi novia por su paciencia y aliento constante. A mi compañero de tesis por su esfuerzo y compromiso para alcanzar juntos el éxito en este trabajo. También agradezco a nuestro tutor de tesis Msc. Jeffrey Barberán por su guía académica, y a todos los docentes y personal de ESPOL que, con sus enseñanzas y consejos, han contribuido a mi formación y crecimiento profesional, destacando al PhD. Juan Núñez, por sus valiosos consejos y asistencia desinteresada, finalmente a VEOLIA, por su colaboración y aporte técnico en la realización de este estudio.

Hugo F. Romero L.

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros José Fabricio Cabrera Toro y Hugo Fabian Romero Loayza acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 15 de marzo del 2025.

José Fabricio Cabrera Toro

Hugo Fabian Romero
Loayza

EVALUADORES

Ing. Fernanda Mejía Peralta, M.Sc.

Profesor de Materia

Ing. Jeffrey Manuel Barberan

Solorzano, M.Sc.

Tutor de proyecto

RESUMEN

El presente proyecto investiga la aplicación de tecnologías de medición y comunicación para el control del consumo de agua potable en edificios nuevos de la ciudad de Guayaquil. Su objetivo general es diseñar una matriz de selección que compare, de forma objetiva, diversas configuraciones tecnológicas con base en criterios de precisión, seguridad y costo, partiendo de la hipótesis de que la integración de sistemas de medición inteligentes optimiza la eficiencia operativa y reduce las pérdidas por fugas, en consonancia con la normativa vigente y las necesidades locales. La justificación se fundamenta en la urgencia de modernizar la infraestructura hídrica y garantizar la transparencia en la facturación, contribuyendo así a la sostenibilidad del servicio. Para ello, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura y de la normativa aplicable, se compararon diferentes tecnologías de medición (medidores ultrasónicos no intrusivos y volumétricos) y de comunicación (LoRaWAN, RF Fija, RF Móvil y GPRS) y, mediante un enfoque metodológico de tipo cascada, se elaboraron diversas matrices de selección. Los resultados indican que la configuración basada en medidores ultrasónicos de alta sensibilidad (R400) combinada con tecnologías de comunicación LoRaWAN facilita el registro de caudales bajos e intermitentes, fortaleciendo el control de consumos y la precisión en la facturación. Se concluye que la herramienta de decisión desarrollada orienta eficazmente la selección de tecnologías adaptadas a las condiciones locales de Guayaquil y se presenta como una solución replicable y actualizable para la modernización del sistema hídrico.

Palabras Clave: Tecnología, medición, comunicación, RF, LoRaWAN.

ABSTRACT

This project examines the application of metering and communication technologies to control potable water consumption in new buildings in Guayaquil. The main objective is to design a selection matrix that objectively compares various technological configurations based on accuracy, security, and cost—under the hypothesis that integrating smart metering systems improves operational efficiency and reduces unaccounted-for water losses, in accordance with current regulations and local requirements. The justification lies in the pressing need to modernize water infrastructure and ensure transparent billing, thereby supporting a sustainable service. For this purpose, a systematic review of relevant literature and applicable regulations was conducted, followed by a comparative analysis of different metering technologies (ultrasonic non-intrusive and volumetric meters) and communication protocols (LoRaWAN, fixed RF, mobile RF, and GPRS). These were then evaluated through a cascade-based methodological approach, resulting in various selection matrices. Findings indicate that a configuration involving high-sensitivity ultrasonic meters (R400) combined with LoRaWAN communication enhances the measurement of low and intermittent flow rates, thereby strengthening consumption monitoring and billing accuracy. It is concluded that the developed decision-support tool effectively guides the selection of technologies tailored to Guayaquil's local conditions and represents a replicable, updatable solution for modernizing the city's water system.

Keywords: Technology, measurement, communication, RF, LoRaWAN.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1	9
1. Introducción	9
1.1 Antecedentes	10
1.2 Localización.....	11
1.3 Estudios previos	12
1.4 Problemática a Resolver.....	13
1.5 Justificación	14
1.6 Objetivos	15
1.6.1 Objetivo General	15
1.6.2 Objetivos Específicos.....	15
CAPÍTULO 2	16
2. Desarrollo del proyecto	16
2.1 Marco conceptual	16
2.1.1 Definiciones conceptuales.....	17
2.1.2 Gestión Hídrica en Entornos Urbanos Verticales	18
2.1.3 Tecnologías de Medición	19
2.1.4 Integración con IoT, Redes de Comunicación y Análisis de Datos	19
2.1.5 Políticas tarifarias, equidad, asequibilidad y sostenibilidad.....	21

2.1.6	Calidad del agua, sensores multiparamétricos y condiciones locales	22
2.1.7	Integración de enfoques y criterios para la selección de tecnologías	23
2.1.8	Perspectiva holística y relevancia local	23
2.2	Marco metodológico	24
2.2.1	Revisión de literatura y normativa	24
2.2.2	Definición de criterios y escalas de evaluación	25
2.2.3	Criterio en Cada Matriz	28
2.2.4	Construcción de la Matriz de Selección.....	30
2.2.5	Diseño de la Herramienta de Ponderación	30
CAPÍTULO 3		32
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1	Resultados	32
3.1.1	Matrices de Selección	33
3.1.2	Matriz de Selección – Prioridad Precisión	33
3.1.3	Matriz de Selección – Prioridad Seguridad.....	36
3.1.4	Matriz de Selección – Prioridad Costo.....	38
3.1.5	Herramienta de ponderación: casos de uso	40
3.1.6	Hallazgos Principales.....	44
3.2	Análisis de resultados y discusión	44
CAPÍTULO 4		46
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	46
4.1	Conclusiones.....	46
4.2	Recomendaciones.....	47
BIBLIOGRAFÍA		49

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ARCA	Agencia de Regulación y Control del Agua
IoT	Internet de las Cosas
RF	Radiofrecuencia
NB-IoT	NarrowBand Internet of Things
GPRS	General Packet Radio Service
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
TCM	Tecnologías de Control y Medición
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
TFM	Trabajo de Fin de Máster

SIMBOLOGÍA

L	Litro
m ³	Metro cúbico
Q	Caudal (flujo de agua)
Δt	Intervalo de tiempo
ε	Error en la medición
η	Eficiencia operativa
f	Frecuencia de lectura
%	Porcentaje

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación de la ciudad de Guayaquil y zona de estudio	12
Figura 2.1. Esquema metodológico de tipo cascada.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de Tecnologías de Medición de Agua	19
Tabla 2.2. Comparación de Tecnologías de Comunicación en Sistemas de Medición de Agua.....	20
Tabla 2.3. Impacto de la Calidad del Agua en Distintos Tipos de Medidores	22
Tabla 2.4. Escala de seguridad	26
Tabla 2.5. Escala de Costo en Medición.....	27
Tabla 2.6. Escala de Costo en Comunicación	27
Tabla 2.7. Escala de Costo en Infraestructura Hídrica.....	28
Tabla 3.1. Matriz de selección - prioridad precisión	35
Tabla 3.2. Matriz de selección - prioridad seguridad.....	37
Tabla 3.3. Matriz de selección - prioridad costo.....	39
Tabla 3.4. Resultado del caso 1	41
Tabla 3.5. Resultado del caso 2	42
Tabla 3.6. Resultado del caso 3	43

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente del recurso hídrico en entornos urbanos constituye un desafío crítico debido al crecimiento poblacional, la verticalización de las edificaciones y las presiones derivadas del cambio climático (Buytaert & Bievre, 2012a; Carchi et al., 2023; González-Zeas et al., 2022). En ciudades latinoamericanas, el incremento de la construcción de edificios nuevos dificulta el control y la medición individual del consumo de agua potable, ya que el acceso a los medidores, la detección temprana de fugas y la facturación precisa se ven afectados por factores como la seguridad, la privacidad y la disponibilidad de herramientas tecnológicas (Martínez-Solano et al., 2017; Wingfield et al., 2021).

A nivel internacional se ha evidenciado que la adopción de tecnologías de medición inteligente y sistemas comunicación remota optimiza la operación de las redes de agua. Los medidores electrónicos y los sistemas basados en el Internet de las Cosas (IoT)

permiten la recopilación de datos en tiempo real, el análisis avanzado de patrones de consumo y la implementación de estrategias de gestión hídrica que reducen pérdidas y facilitan la detección de consumos anómalos (Fuentes & Mauricio, 2020; Mileiko et al., 2021). Sin embargo, la aplicación de estas soluciones en el contexto de Guayaquil requiere un enfoque contextualizado que contemple las particularidades de la infraestructura, el clima tropical y la normativa local vigente.

El presente trabajo se orienta a identificar y analizar las tecnologías de medición y comunicación disponibles en Guayaquil para el control y monitoreo del consumo de agua potable en edificios nuevos; definir las prioridades y criterios para la selección de las tecnologías; proponer configuraciones de medición y comunicación técnicamente viables de acuerdo con la normativa local y las recomendaciones o lineamientos técnicos de la empresa operadora. A partir de ello, se desarrollará una matriz de selección que compare de forma objetiva diferentes configuraciones tecnológicas, facilitando la toma de decisiones a constructores y gestores. Finalmente, se diseñará e implementará una herramienta de ponderación que permita al usuario asignar distintos pesos a los criterios de seguridad, costo en medición, costo en comunicación e infraestructura hídrica, generando una recomendación personalizada (Ntambara et al., 2023; Rizzo et al., 2021). Implementar estas tecnologías contribuye a la sostenibilidad operativa del sistema hídrico, al mejorar la eficiencia en la detección de fugas y en la facturación, y al alinear el servicio de agua potable con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y ODS 11), los lineamientos normativos ecuatorianos y los criterios de resiliencia urbana (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2017, 2022).

1.1 Antecedentes

El suministro eficiente de agua potable en entornos urbanos se ve afectado por múltiples factores, entre ellos el crecimiento demográfico, la verticalización y el cambio climático, que inciden en la capacidad de las infraestructuras tradicionales para registrar consumos de manera precisa (Buytaert & Bievre, 2012a; Carchi et al., 2023; González-Zeas et al., 2022). En América Latina, la construcción de torres residenciales y comerciales dificulta la gestión hídrica, ya que se debe garantizar la lectura precisa de medidores, la detección oportuna de fugas y la facturación confiable (Martínez-Solano et al., 2017; Wingfield et al., 2021).

Los medidores mecánicos tradicionales presentan limitaciones para registrar caudales bajos y flujos intermitentes y no permiten transmisión de datos en tiempo real, generando

pérdidas, ineficiencias económicas y controversias en la facturación (Arregui et al., 2020; Feng et al., 2021; Palermo et al., 2022; Rizzo et al., 2021).

A escala internacional, la incorporación de medidores inteligentes y sistemas basados en IoT ha permitido optimizar la gestión del recurso hídrico mediante la identificación de patrones de consumo, la detección temprana de fugas y la integración de datos en plataformas en la nube (Fuentes & Mauricio, 2020; Mileiko et al., 2021; Ntambara et al., 2023). Por ejemplo, los servicios públicos de agua aprovechan los datos de medidores inteligentes para estimar perfiles diarios de demanda y factores de máxima demanda, contribuyendo a planificar redes de distribución (Gurung et al., 2014). Además, estas tecnologías facilitan la gestión de la demanda y elevan la eficiencia operativa de las empresas proveedoras (Beal & Flynn, 2015). Con la información disponible en tiempo real, los usuarios también pueden optimizar su consumo de agua (Cristiano et al., 2024; Makropoulos et al., 2014).

En Ecuador, dichas iniciativas se enmarcan en las directrices de la ARCA, que promueve la optimización y el control de costos en la prestación de servicios de agua potable y saneamiento, buscando garantizar el derecho humano al agua en condiciones de eficiencia y equidad (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2017). Particularmente, la Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022 enfatiza la adopción de sistemas de micromedición (Art. 18) y el establecimiento de catastros actualizados (Art. 19), con el objetivo de identificar y cuantificar las pérdidas y aplicar criterios técnicos en la selección e instalación de medidores, impulsando un servicio más confiable y transparente para los usuarios (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2022).

Estos antecedentes resaltan la pertinencia de identificar y analizar las tecnologías disponibles en el mercado, definiendo criterios y escalas que tomen en cuenta las condiciones locales para la adopción de sistemas de medición y comunicación, así como la importancia de desarrollar instrumentos que faciliten la selección óptima.

1.2 Localización

El proyecto se desarrolla en la ciudad de Guayaquil, situada en la región Litoral del Ecuador, en la zona costera del Golfo de Guayaquil (Figura 1.1). Guayaquil se caracteriza por la prevalencia de edificaciones verticales en zonas urbanas consolidadas y un clima tropical que influye en la demanda hídrica. El crecimiento sostenido de la ciudad ha impulsado la construcción de nuevos edificios residenciales y comerciales, lo

que demanda la implementación de soluciones tecnológicas avanzadas para el monitoreo y control del consumo de agua, adaptadas a las condiciones locales de infraestructura, clima y normativa (Carchi et al., 2023).

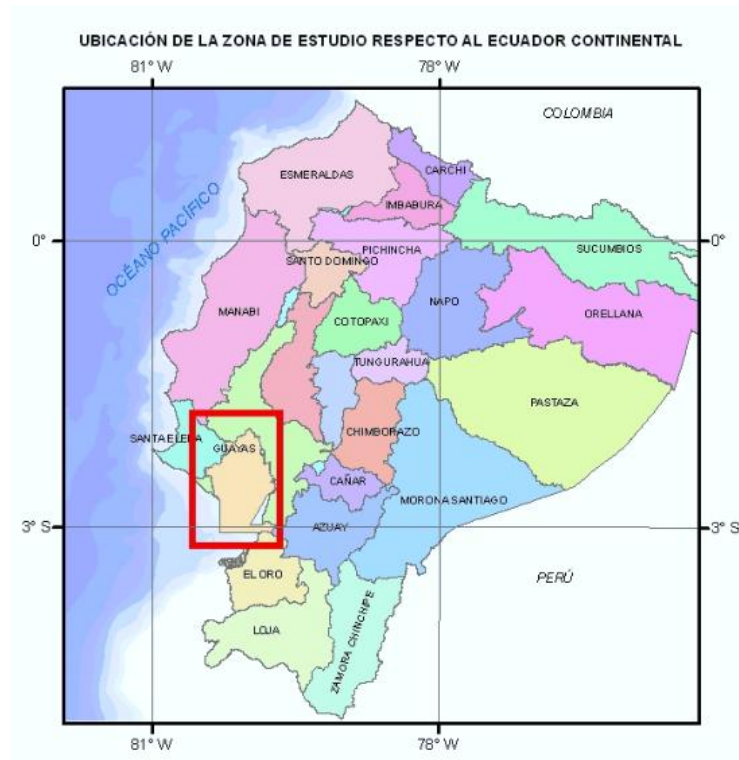


Figura 1.1: Ubicación de la ciudad de Guayaquil y zona de estudio

1.3 Estudios previos

Para la elaboración de este proyecto se consideraron, por una parte, los requerimientos técnicos y operativos proporcionados por la empresa operadora del servicio de agua potable, y, por otra, la revisión exhaustiva de literatura científica y normativa vigente. Entre los estudios destacados se encuentran investigaciones sobre la adopción de medidores inteligentes y sistemas IoT para el control de consumos, análisis de la precisión y limitaciones de los medidores mecánicos tradicionales, y evaluaciones económicas de soluciones de comunicación en redes de agua (Arregui et al., 2020; Fuentes & Mauricio, 2020; Ntambara et al., 2023).

Esta información sustenta la propuesta de desarrollar una matriz de comparación que integre factores técnicos, económicos y sociales, permitiendo evaluar de manera objetiva las configuraciones de medición y comunicación disponibles para edificios nuevos en la ciudad de Guayaquil.

1.4 Problemática a Resolver

En la ciudad de Guayaquil, los medidores mecánicos tradicionales presentan limitaciones importantes para registrar caudales bajos y flujos intermitentes, además de no permitir la transmisión de datos en tiempo real, lo que retrasa la detección de fugas y consumos anómalos (Arregui et al., 2020; Ethem Karadirek, 2020; Feng et al., 2021; Palermo et al., 2022; Schumann et al., 2021). La lectura de estos medidores se complica aún más en edificios verticales, debido a la seguridad y privacidad que restringen el acceso a cada unidad, generando retrasos en la facturación y aumentando la probabilidad de errores en la toma de lecturas (Ethem Karadirek, 2020; Rizzo et al., 2021).

Además, la carencia de infraestructura de comunicación adecuada y la ausencia de criterios técnicos estandarizados para la selección de tecnologías avanzadas limitan la adopción de soluciones modernas, lo que resulta en la preferencia por sistemas convencionales que no garantizan la precisión necesaria (Carchi et al., 2023; Wingfield et al., 2021).

Las condiciones locales exigen un análisis integral de los factores que intervienen en la implementación de estas tecnologías: los costos iniciales de instalación, la compatibilidad con la infraestructura hídrica existente, el mantenimiento y la aceptación por parte de los usuarios finales. Aunque se han desarrollado soluciones eficaces a nivel internacional, la carencia de una herramienta de selección y comparación adaptada al contexto ecuatoriano hace que la adopción de dichas tecnologías se dificulte, provocando que muchas edificaciones nuevas opten por sistemas convencionales que no resuelven las carencias en precisión y detección de fugas.

En este escenario, la investigación se centra en identificar y analizar las tecnologías disponibles, definir las prioridades y criterios de selección, proponer configuraciones técnicamente viables, adaptadas al contexto local y las recomendaciones de la empresa operadora, para finalmente desarrollar una matriz y una herramienta que oriente tanto a los constructores como a la empresa operadora en la comparación y selección de tecnologías de medición y comunicación. Con ello, se persigue una modernización sostenible de la medición en edificios nuevos de Guayaquil, alineando la gestión hídrica con las necesidades de la urbe y con objetivos de eficiencia operativa. En relación con ello, la Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022 (Art. 20) establece la obligatoriedad de contar con micromedición en las conexiones residenciales y no residenciales, promoviendo la obtención de datos precisos y confiables para detectar consumos

atípicos. De igual modo, la falta de cobertura de micromedición deberá solventarse a través de proyectos específicos de modernización y seguimiento, integrados en los planes de mejora (Art. 28).

1.5 Justificación

La modernización de la medición y monitoreo del consumo de agua en edificaciones verticales resulta esencial para garantizar la eficiencia operativa y la sostenibilidad del recurso hídrico. Estas tecnologías permiten la detección de fugas y consumos irregulares, optimizando costos y promoviendo un uso racional del agua (Fuentes & Mauricio, 2020; Palermo et al., 2022). Además, la información detallada del consumo involucra al usuario en la toma de decisiones, fomentando buenas prácticas de ahorro hídrico (Cristiano et al., 2024; Makropoulos et al., 2014).

La investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, principalmente con el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento) y el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), al promover sistemas urbanos de agua resilientes y eficientes. A nivel local, responde a la necesidad de modernizar la infraestructura hídrica y mejorar la calidad del servicio en edificios nuevos, contribuyendo a la resiliencia urbana de Guayaquil (Carchi et al., 2023; Rizzo et al., 2021). Al mismo tiempo, el desarrollo de una matriz de selección y la implementación de una herramienta de ponderación ofrecen a constructores y gestores de proyectos una vía para tomar decisiones fundamentadas en criterios técnicos y económicos, ajustados a la infraestructura y normativa de Guayaquil, fortaleciendo la gestión hídrica y la sostenibilidad de la ciudad.

En Ecuador, la ARCA ha establecido normativas que exigen la implementación de sistemas de micromedición y la actualización de catastros, orientadas a reducir pérdidas y garantizar la calidad del servicio (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2017). La adopción de tecnologías inteligentes no solo contribuye a cumplir con estas disposiciones, sino que también fortalece la transparencia en la facturación y promueve la equidad en el acceso al agua potable. En consecuencia, la presente investigación se justifica por la necesidad de contar con una herramienta de comparación que oriente la selección de tecnologías de medición y comunicación adaptadas a las condiciones locales, facilitando la modernización del sistema hídrico en edificios nuevos de Guayaquil (Carchi et al., 2023; Rizzo et al., 2021).

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Diseñar una matriz de selección que permita escoger y comparar, de manera objetiva, las tecnologías de medición y comunicación más adecuadas para el control de consumos de agua potable en edificios nuevos de la ciudad de Guayaquil, en función de las prioridades y necesidades del usuario.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Identificar y analizar las tecnologías de medición y comunicación disponibles para edificios nuevos mediante una revisión exhaustiva de la literatura y el análisis de la información técnica proporcionada por la empresa operadora
- Definir criterios y escalas de evaluación para comparar las tecnologías en términos de economía en medición, costos de comunicación, infraestructura hídrica y seguridad, considerando las particularidades del contexto urbano de Guayaquil
- Proponer configuraciones de medición y comunicación basadas en la normativa local y las recomendaciones de la operadora, que garanticen la precisión, confiabilidad y viabilidad técnica.
- Desarrollar una matriz de selección estructurada en función de las prioridades (precisión, seguridad y costo) que facilite la toma de decisiones a constructores y gestores de proyectos, permitiendo la implementación de tecnologías de medición y comunicación en edificaciones nuevas.
- Diseñar e implementar una herramienta de ponderación que permita a los usuarios asignar pesos relativos a cada criterio (seguridad, costo en medición, costo en comunicación e infraestructura hídrica), a fin de generar una recomendación personalizada basada en la matriz de selección propuesta.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

La construcción del marco conceptual responde, principalmente, a la necesidad de identificar y analizar los elementos clave que inciden en la medición y comunicación del consumo de agua en edificios nuevos de Guayaquil. Se parte de la complejidad del entorno urbano, marcado por la verticalización, el crecimiento demográfico y el cambio climático, como un factor que influye directamente en la eficiencia y precisión de la medición del consumo (Buytaert & Bievre, 2012a; Carchi et al., 2023; González-Zeas et al., 2022).

En este sentido, es relevante definir criterios y escalas que reflejen la realidad local de Guayaquil, de modo que las futuras configuraciones de medición y comunicación y la matriz de selección puedan considerar la infraestructura existente, el clima tropical y la

normativa nacional vigente (ARCA). Además, el diseño de este capítulo sienta las bases para, en etapas posteriores, implementar una herramienta de ponderación (Objetivo 5) que permita asignar distintos pesos a los criterios seleccionados (seguridad, costo, etc.). La Figura 2.1 ilustra la relación entre los factores externos —como clima y densidad poblacional—, la infraestructura hídrica y las tecnologías de medición. A su vez, se evidencia la importancia de la micromedición para optimizar el servicio, en línea con la Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022 (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2022).

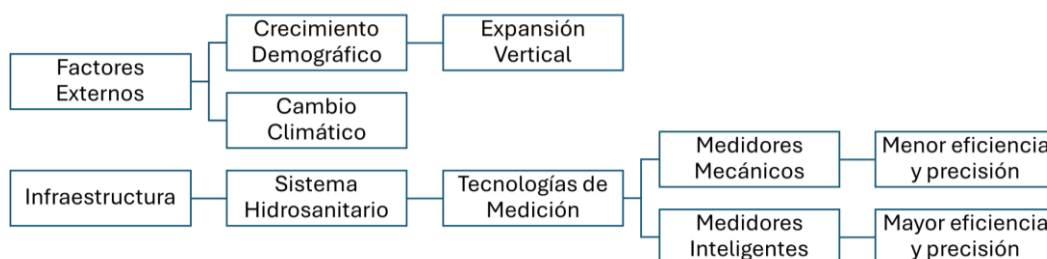


Figura 2.1. Relación entre factores externos, infraestructura hídrica y tecnologías de medición en el consumo de agua potable en edificios verticales.

Fuente: Elaboración propia basada en datos de (Buytaert & Bievre, 2012b; Carchi et al., 2023)

2.1.1 Definiciones conceptuales

Para orientar el análisis de las tecnologías y establecer criterios de evaluación, se definen los siguientes conceptos clave:

- a) Edificios nuevos:** Construcciones residenciales o comerciales en fase de diseño o construcción, con permisos recientes. Se asume que pueden adaptar sistemas de medición avanzados desde etapas tempranas.
- b) Gestión hídrica en entornos urbanos verticales:** Conjunto de acciones, políticas y tecnologías destinadas a regular el consumo, la distribución y la calidad del agua en edificios de gran altura o alta densidad poblacional (Carchi et al., 2023; González-Zeas et al., 2022).
- c) Medidor inteligente:** Dispositivo de medición electrónica que registra el consumo de agua en tiempo real, permitiendo la transmisión de datos y el análisis avanzado (por ejemplo, detección de fugas, patrones de consumo). A diferencia de los medidores mecánicos tradicionales, estos equipos pueden operar con tecnologías de comunicación remota y almacenar información histórica (Fuentes & Mauricio, 2020; Mileiko et al., 2021).

- d) Micromedición (Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022, Art. 18):** Sistema de medición que se localiza en cada conexión residencial o no residencial, permitiendo registrar el consumo de agua de manera individualizada y asegurando datos confiables para la facturación y la detección de fugas (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2022).
- e) Eficiencia operativa:** Capacidad de un sistema hídrico de reducir pérdidas, minimizar costos y mejorar el servicio al usuario, con base en la optimización de procesos y uso de tecnologías adecuadas (Fuentes & Mauricio, 2020).
- f) Resiliencia hídrica:** Capacidad de un sistema de abastecimiento de agua para adaptarse a condiciones cambiantes (demográficas, climáticas o de infraestructura) sin comprometer la disponibilidad ni la calidad del recurso (Carchi et al., 2023).

2.1.2 Gestión Hídrica en Entornos Urbanos Verticales

La creciente demanda de agua en ciudades densas, sumada al cambio climático y las migraciones, requiere criterios de evaluación enfocados en la precisión y fiabilidad de la medición. En edificios altos, es crítico no solo asegurar la presión y caudal adecuados, sino también proponer configuraciones que permitan detectar fugas en múltiples niveles y establecer facturaciones equitativas. (Buytaert & Bievre, 2012a; Carchi et al., 2023; González-Zeas et al., 2022).

El cambio climático, el crecimiento demográfico y las migraciones afectan la disponibilidad y calidad del agua, obligando a adoptar estrategias que mejoren la eficiencia hídrica, reduzcan pérdidas y garanticen la sostenibilidad (Ortiz et al., 2022; Profiroi et al., 2020). En este contexto, la modernización de la infraestructura hídrica y la adopción de tecnologías avanzadas de medición se vuelven esenciales para asegurar una gestión adaptativa ante escenarios inciertos (González-Zeas et al., 2022; Wingfield et al., 2021).

La gestión hídrica en edificios altos implica no solo resolver desafíos de presión y caudal, sino también garantizar la fiabilidad en la lectura de medidores, la detección de fugas en múltiples niveles y la integración de información para una facturación equitativa. Asimismo, la normativa local y los lineamientos de empresas proveedoras de agua pueden requerir la instalación de telemetría, especialmente en zonas de difícil acceso o con altas tasas de fuga.

2.1.3 Tecnologías de Medición

Un punto esencial para identificar y analizar tecnologías (Objetivo 1) es conocer las limitaciones de los medidores mecánicos, así como las ventajas de alternativas ultrasónicas, electromagnéticas o volumétricas. De acuerdo con (Arregui et al., 2020; Ethem Karadirek, 2020), los medidores mecánicos tradicionales presentan problemas para registrar caudales bajos o detectar consumos intermitentes, especialmente en edificios altos.

La Tabla 2.1 ofrece una comparación de las principales tecnologías de medición, considerando parámetros como rango de caudal, sensibilidad a la calidad del agua y costo aproximado. Estos datos permitirán, en capítulos posteriores, definir escalas de evaluación y, finalmente, desarrollar la matriz de selección.

Tabla 2.1. Comparación de Tecnologías de Medición de Agua

Tecnología	Rango de caudal (L/h)	Error máximo (±%)	Sensibilidad a calidad del agua	Costo (aprox.)	Mantenimiento	Referencias
Medidor mecánico	30–3000*	±2–5%	Alta, sensible a incrustaciones	Bajo	Medio	(Arregui et al., 2020; Ethem Karadirek, 2020)
Ultrasónico no intrusivo	200–650	±5.7% (según ángulo)	Menor sensibilidad; depende del ángulo y del material	Medio-Alto	Bajo	(Kroner et al., 2022; Li & Chong, 2019; Mileiko et al., 2021)
Electromagnético	Variable, según modelo	±2–3%	Menor, estable ante variaciones químicas	Medio-Alto	Bajo	(Kroner et al., 2022; Lanza, 2022)
Volumétrico	Flujos bajos (<100 L/h)*	±2%	Moderada; puede ser afectado por partículas en suspensión	Medio	Medio	(Arregui et al., 2020; Schumann et al., 2021)

Nota: *Los rangos de caudal y costos son referenciales y dependen de las especificaciones del fabricante.

2.1.4 Integración con IoT, Redes de Comunicación y Análisis de Datos

La incorporación de IoT y comunicación remota resulta clave al momento de proponer configuraciones y diseñar una matriz de selección que evalúe criterios de seguridad y costos. Tecnologías como NB-IoT, LoRaWAN o GSM/3G/4G permiten obtener datos en

tiempo real y detectar consumos anómalos (Feng et al., 2021; Ntambara et al., 2023; Tavares et al., 2018).

Estas tecnologías permiten recolectar información continua sobre caudales, presión, calidad del agua y patrones temporales de uso. El análisis de datos mediante algoritmos de machine learning, clustering y técnicas predictivas facilita la detección de fugas, consumos anómalos y patrones estacionales, optimizando la operación y mantenimiento de la red (Cristiano et al., 2024; Fuentes & Mauricio, 2020; Schumann et al., 2021). Al mismo tiempo, enfoques como la integración de gemelos digitales, blockchain para la seguridad de datos y Big Data potencian la resiliencia, al permitir respuestas más ágiles y transparentes (Hangan et al., 2022; Palermo et al., 2022).

El NB-IoT (NarrowBand IoT) destaca por su bajo consumo energético, gran alcance y penetración en interiores, lo que resulta beneficioso para edificios altos con muros gruesos. LoRaWAN ofrece transmisiones de largo alcance y costos moderados, mientras que los sistemas basados en GSM/3G/4G suelen requerir mayor consumo de energía, pero pueden reutilizar infraestructura celular existente.

De esta manera, se concreta la posibilidad de adaptar la infraestructura hídrica a un modelo inteligente, que sea eficiente en costos y sustentable en el largo plazo. Posteriormente, la herramienta de ponderación podría asignar un peso específico a los costos de comunicación frente a otros criterios (seguridad o infraestructura hídrica).

La Tabla 2.2 resume algunas características relevantes de las tecnologías de comunicación aplicables a edificios verticales.

Tabla 2.2. Comparación de Tecnologías de Comunicación en Sistemas de Medición de Agua

Tecnología	Alcance Aproximado	Costo de Operación	Consumo Energético	Notas	Referencias
NB-IoT	Alto (penetración en interiores)	Bajo	Muy bajo	Ideal para aplicaciones en edificios altos; requiere infraestructura celular mínima	Feng et al. (2021); Ntambara et al. (2023)

Tecnología	Alcance Aproximado	Costo de Operación	Consumo Energético	Notas	Referencias
LoRaWAN	Moderado a largo (hasta 5 km)*	Moderado	Bajo	Protocolo RF de bajo consumo, sin cuotas mensuales; se destaca en entornos urbanos	Ntambara et al. (2023); Tavares et al. (2018)
GSM/3G/4G	Amplio (utiliza infraestructura existente)	Alto (cuotas mensuales)	Alto	Utiliza la red celular existente, pero con mayores costos operativos a largo plazo	Feng et al. (2021)

Nota 1: *El alcance depende de la topografía y la interferencia en entornos urbanos.

Nota 2: LoRaWAN es un protocolo basado en RF, pero se diferencia de la tecnología RF convencional por su bajo consumo y operación en bandas libres. Se incorpora aquí como una opción independiente para enfatizar su aplicabilidad en sistemas de medición inteligentes.

2.1.5 Políticas tarifarias, equidad, asequibilidad y sostenibilidad

Las consideraciones socioeconómicas, incluyendo políticas tarifarias y equidad, influyen en la forma en que se definen criterios para seleccionar tecnologías de medición. Al contemplar variables como la asequibilidad y la sostenibilidad, se busca garantizar un acceso justo al agua y un uso racional del recurso (Carchi et al., 2023; De Moura et al., 2014; Makropoulos et al., 2014; Ntambara et al., 2023; Visser et al., 2021)

En Ecuador, la ARCA promueve lineamientos que incentivan la adopción de sistemas precisos para reducir el desperdicio y garantizar un servicio equitativo (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2017).

Por consiguiente, la futura matriz de selección y la herramienta de ponderación podrán incorporar factores relacionados con la equidad en la facturación, ajustando la importancia de la inversión inicial frente a la mejora en la eficiencia y seguridad. Todo ello contribuye a proponer configuraciones que sean aceptables socioeconómicamente.

2.1.6 Calidad del agua, sensores multiparamétricos y condiciones locales

Las condiciones químicas y físicas del agua afectan la precisión de la medición. La dureza, pH, presencia de partículas o contaminantes pueden generar errores si el medidor no está diseñado para tolerarlos (Kroner et al., 2022).

Para un control más completo, se han propuesto sensores multiparamétricos, espectroscópicos u ópticos permiten caracterizar la calidad del agua en tiempo real, apoyar la toma de decisiones y prevenir riesgos a la salud (Di Nardo et al., 2018). En Guayaquil, la influencia del clima tropical y la variabilidad de la fuente de abastecimiento determinan la conductividad y la dureza del agua (Martínez-Solano et al., 2017; Wingfield et al., 2021), lo cual exige analizar la compatibilidad de los medidores con las condiciones locales.

Por ello, la selección de tecnologías debe considerar la compatibilidad con el tipo de agua en Guayaquil. En la Tabla 2.3, se resumen los impactos de distintos parámetros de calidad del agua sobre varias tecnologías de medición.

Tabla 2.3. Impacto de la Calidad del Agua en Distintos Tipos de Medidores

Parámetro (ej.)	Efecto en Medidor Mecánico	Efecto en Ultrasonico No Intrusivo	Efecto en Electromagnético	Efecto en Volumétrico	Referencias
pH alto	Incrustaciones; errores en la medición	Menor efecto; depende del material	Estable, poco afectado	Variación leve en la medición	Kroner et al. (2022)
Dureza (Ca, Mg)	Depósitos en partes móviles; error	Menor sensibilidad; requiere ajuste del ángulo	Estable; no presenta partes móviles	Afecta ligeramente la precisión	Kroner et al. (2022); Lanza (2022)
Partículas en suspensión	Obstrucción y error en el registro	Puede causar dispersión ultrasónica; requiere calibración	Menor efecto; el campo electromagnético no se altera significativamente	Puede alterar la medición en flujos bajos	Kroner et al. (2022)

Este análisis contribuye a definir escalas de evaluación que reflejen la realidad local, permitiendo luego proponer configuraciones robustas y precisas. Asimismo, la matriz de selección valorará la capacidad de cada tecnología para tolerar condiciones

adversas y, con el uso de la herramienta de ponderación, el usuario podrá priorizar este criterio si la calidad del agua resulta problemática en su edificio.

2.1.7 Integración de enfoques y criterios para la selección de tecnologías

Los estudios señalan la necesidad de regímenes de prueba más realistas, que reflejen el consumo fluctuante en hogares y edificios (Lanza, 2022; Schumann et al., 2021). Además, se recomienda considerar la eficiencia energética y la autosuficiencia del sistema, integrando cosecha de energía (solar o hidráulica) para reducir costos operativos (Li & Chong, 2019; Pimenta & Chaves, 2021). La interoperabilidad y estandarización de protocolos, así como la independencia de un solo proveedor, permiten mayor flexibilidad y escalabilidad a largo plazo (Alvisi et al., 2019; Palermo et al., 2022).

Estos hallazgos ayudan a proponer configuraciones más sostenibles y a definir criterios relacionados con el ahorro de energía en telemetría o la posibilidad de cosecha de energía.

Asimismo, la interoperabilidad y la estandarización de protocolos son factores relevantes para la estabilidad del sistema, lo cual se traducirá en mejores prácticas que, finalmente, se podrán ponderar en la herramienta.

2.1.8 Perspectiva holística y relevancia local

La experiencia internacional muestra que la combinación de medidores inteligentes, IoT, análisis avanzado de datos, políticas tarifarias adecuadas y educación del usuario puede disminuir el consumo, mejorar la equidad, reducir pérdidas y fomentar la sostenibilidad hídrica (Costa & Soares, 2020; Muhammetoglu et al., 2020; Sousa et al., 2019). Para Guayaquil, una urbe con gran número de edificios verticales, dichas lecciones sugieren elaborar un marco de referencia que oriente la selección de tecnologías de medición y comunicación, bajo criterios técnicos (precisión, confiabilidad, facilidad de instalación, resistencia a la calidad del agua), económicos (costos de implementación, operación y mantenimiento) y socioambientales (accesibilidad económica, sostenibilidad y equidad) (Carchi et al., 2023; González-Zeas et al., 2022; Martínez-Solano et al., 2017).

En línea con los objetivos de investigación, el próximo capítulo abordará la metodología empleada para integrar todos estos criterios y, con ello, proponer configuraciones, desarrollar la matriz de selección y, finalmente, diseñar la herramienta de ponderación. Esta mirada holística asegura que la tecnología de

medición y comunicación elegida se alinee con la realidad local de Guayaquil, promoviendo la resiliencia urbana y el uso racional del agua.

2.2 Marco metodológico

La presente investigación se desarrolló mediante un enfoque metodológico de tipo cascada, en el que cada fase responde a los objetivos planteados y provee los insumos necesarios para la siguiente (Figura 2.1). De esta manera, se garantiza la coherencia entre la revisión bibliográfica, la definición de criterios, la propuesta de configuraciones, la elaboración de la matriz de selección y el diseño de la herramienta de ponderación.

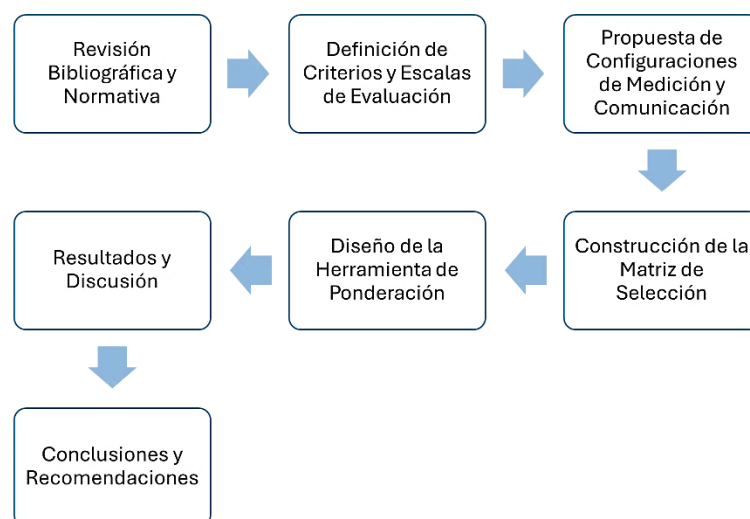


Figura 2.1. Esquema metodológico de tipo cascada.

2.2.1 Revisión de literatura y normativa

Se llevó a cabo una búsqueda sistemática en bases de datos académicas (Scopus, Web of Science, Google Scholar) y repositorios institucionales, complementada con la consulta de documentos normativos relevantes, entre los que destacan la Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022 y DIR-ARCA-RG-006-2017 de la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA). Se seleccionaron fuentes recientes (preferentemente desde 2019) que abordaran la eficiencia, seguridad y economía en la medición del consumo de agua y el uso de tecnologías IoT en entornos urbanos.

Criterios de búsqueda y selección:

- **Palabras clave:** “smart water meters”, “LoRaWAN”, “GPRS”, “radiofrequency in water systems”, “micromasurement”, “ARCA and Ecuador”.
- **Criterios de inclusión:** Enfoques sobre eficiencia, seguridad y economía en la medición de consumo de agua, uso de tecnologías IoT y normativas ecuatorianas.

- **Procesamiento:** La información extraída permitió elaborar un panorama sobre medidores inteligentes (p.ej., R315, R400), protocolos de comunicación (LoRaWAN, RF Fija, RF Móvil, GPRS), costos asociados y requerimientos de instalación.

2.2.2 Definición de criterios y escalas de evaluación

A partir de la información recabada en la revisión bibliográfica y de la retroalimentación técnica de la operadora local, se establecieron cuatro criterios fundamentales para la evaluación de las tecnologías de medición y comunicación:

- Seguridad
- Costo en Medición
- Costo en Comunicación
- Costo en Infraestructura Hídrica

Para asegurar la comparabilidad entre criterios, cada uno se estandarizó en una escala porcentual que va desde 0 % (opción menos favorable) hasta 100 % (opción más favorable). Cuando un criterio tenía niveles discretos (por ejemplo, 1 a 7), se aplicó la siguiente fórmula de normalización:

$$\text{Valor Normalizado } (i) = \frac{i-1}{N-1} \times 100\% \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (2-1)$$

Cuando $i = 1$, "el valor normalizado es " 0%.

Cuando $i = N$, "el valor normalizado es " 100%.

Ejemplo: Para la escala de Seguridad con 7 niveles, el nivel 1 se normaliza a 100 % (Muy Seguro), mientras que el nivel 7 corresponde a 0 % (Muy Inseguro).

A continuación, se presentan las tablas de estandarización para cada criterio, sus escalas y la descripción de cada nivel.

a) Criterio: Seguridad

Se define como la capacidad del sistema para asegurar y gestionar de forma confiable la información de consumo (incluida la opción de corte remoto), minimizando el riesgo de acceso o manipulación no autorizados. No se limita únicamente al acceso físico al medidor, sino que abarca la disponibilidad segura de los datos, la protección ante intervenciones indebidas y el control remoto cuando resulte necesario. Para cuantificar este aspecto, se adoptó una escala discreta de 7 niveles (1 a 7) que, tras la normalización, se convierte en un rango de 100 % (máxima seguridad) a 0 % (mínima seguridad), tal como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Escala de seguridad

Criterio	Escala		Nivel de Seguridad	Descripción
Seguridad	1	100%	Muy Seguro	Máxima seguridad. Comunicación LoRaWAN-RF – Nube, sin necesidad de lectorador y con capacidad de corte remoto.
	2	83%	Seguro	Sin lectorador y acceso eventual por corte; los gabinetes están ubicados en la Planta Baja (PB), facilitando el acceso.
	3	67%	Moderadamente Seguro	Sin lectorador y acceso eventual por corte; el gabinete se ubica en cada planta del edificio, aumentando la complejidad de acceso.
	4	50%	Medianamente Seguro	Sin lectorador y acceso eventual por corte; cada unidad habitacional tiene su propio gabinete, lo que dificulta el acceso centralizado.
	5	33%	Moderadamente Inseguro	Con lectorador y acceso eventual por corte, pero el gabinete está ubicado en la Planta Baja (PB), permitiendo acceso restringido.
	6	17%	Inseguro	Con lectorador y acceso eventual por corte; el gabinete se encuentra en cada planta del edificio, complicando la gestión.
	7	0%	Muy Inseguro	Con lectorador y acceso eventual por corte; cada unidad habitacional tiene su propio gabinete, dificultando el acceso y la gestión remota.

Nota 1: En esta tabla, “1=100 %” significa la configuración más segura, mientras que “7=0 %” denota la menos segura.

b) Criterio: Costo en Medición

Se evalúa el costo asociado al tipo de medidor y su nivel de precisión. Según Hossain et al. (2019) y Schumann et al. (2021), un medidor de mayor sensibilidad (R400) tiende a tener un costo inicial más elevado, mientras que un medidor con menor sensibilidad (R315) presenta un costo menor. Aunque los medidores mecánicos convencionales (por ejemplo, los medidores rotatorios) resultan ser más económicos, se excluyeron de este criterio debido a que su método de medición no garantiza una fiabilidad adecuada en el registro de datos. Además, su desempeño puede variar según la posición de instalación, lo cual afecta la precisión de las lecturas. Por esta razón, la operadora de Guayaquil no recomienda estos equipos para proyectos nuevos que demandan lecturas precisas y seguras. De este modo, se estableció una escala discreta de 2 niveles, normalizados a 100 % (menor costo) y 0 % (mayor costo)

(ver Tabla 2.5), centrada exclusivamente en los medidores volumétricos (R315) y ultrasónicos (R400).

Tabla 2.5. Escala de Costo en Medición

Criterio	Escala	Valor Normalizado	Tipo de Medidor / Precisión	Costo Referencial (USD)	Costo Referencial (USD)
Costo en Medición	1	100%	M.2. Medidor R315 → P.2. Menor Sensibilidad	\$ 31.50	Menor sensibilidad y menor costo
	2	0%	M.1. Medidor R400 → P.1. Mayor Sensibilidad	\$ 120.00	Mayor sensibilidad y mayor costo

Nota: En esta tabla, “1=100 %” significa la opción más económica (R315), mientras que “2=0 %” denota la opción con costo más alto (R400). Los costos se obtuvieron de proformas que proporcionó la Empresa Operadora.

c) Criterio: Costo en Comunicación

Este criterio considera tanto los costos fijos (hardware, gateways, antenas) como los costos operativos (planes de datos) a lo largo de la vida útil de la edificación, estimada en 40 años. Según Ntambara et al. (2023), tecnologías como LoRaWAN presentan un costo inicial moderado pero cuotas mensuales muy bajas o nulas, mientras que GPRS, si bien tiene una inversión inicial baja, conlleva cuotas elevadas a largo plazo. (Ver Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Escala de Costo en Comunicación

Criterio	Escala	Valor Normalizado	Tipo de Comunicación	Fuente	Descripción
Costo en Comunicación	1	100%	LoRaWAN	Lalle et al. (2020), Bobkov et al. (2020), Sushma et al. (2023)	Costo moderado de instalación (gateway), sin pago mensual de datos. Rentable a 40 años si se implementa en una red con gran cantidad de medidores.
	3	33%	RF Móvil	Carrillo et al. (2021), Carchi et al. (2023)	Recomendado para edificios pequeños y medianos. Sin embargo, se debe considerar los costos de mano de obra.
	2	67%	RF Fija	Mamede et al. (2023), Costa & Soares (2020)	No requiere plan de datos, pero sí concentradores y antenas. Más económica que GPRS para redes de medidores de tamaño medio o grande y más estable que la lectura manual.
	4	0%	GPRS	Hossain et al. (2018), Ntambara et al. (2023)	Bajo costo inicial (requiere SIM por medidor), pero genera cuotas mensuales elevadas, lo que lo hace menos viable en implementaciones a gran escala.

Nota: En esta tabla, “1=100 %” es la alternativa más rentable a largo plazo, mientras que “2=0 %” denota la opción menos favorable.

d) Criterio: Costo en Infraestructura Hídrica

Por último, se evalúa la complejidad de la instalación en función de la ubicación del medidor (por unidad habitacional, por piso o por edificio). Estudios como Costa & Soares (2020) indican que sistemas más centralizados aumentan la cantidad de tuberías y accesorios, elevando los costos de infraestructura. Se definieron 3 niveles normalizados (ver Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Escala de Costo en Infraestructura Hídrica

Criterio	Escala	Valor Normalizado	Tipo de Ubicación	Descripción / Observación	Consideraciones Técnicas
Costo en Infraestructura Hidráulica	1	100%	Medidor por Unidad Habitacional	Menor cantidad de tuberías y accesorios.	Una línea principal asciende hasta la planta más alta, desde donde se derivan líneas secundarias a cada Unidad Habitacional. Cada unidad cuenta con su propio medidor.
	2	50%	Gabinete por Piso	Mayor cantidad de tuberías y accesorios en comparación con (1).	Una línea principal llega hasta la planta superior, donde se ubica un gabinete de medidores por cada piso. Desde cada gabinete se distribuyen líneas individuales hacia cada Unidad Habitacional.
	3	0%	Gabinete por Edificio	Mayor cantidad de tuberías y accesorios en comparación con (2).	Una línea principal se extiende desde la acometida hasta la planta baja, donde se ubica un gabinete común con todos los medidores. Desde ahí, una línea independiente se dirige a cada Unidad Habitacional en cada piso.

Nota: En esta tabla, “1=100 %” corresponde al menor costo en infraestructura (medidor por unidad), mientras que “2=0 %” refleja el mayor costo (gabinete centralizado por edificio).

Las escalas se la han definido de acuerdo con los posibles escenarios, ordenándolos del más favorable al más desfavorable. Las escalas son de elaboración propia en base a la revisión de la literatura, costos del mercado y con revisión de la Empresa Operadora del Servicio de Agua Potable en Guayaquil.

2.2.3 Criterio en Cada Matriz

Con los criterios y escalas definidos, se elaboró un listado de configuraciones que combinan:

- **Tipo de Medidor:** Volumétrico (R315), Ultrasónico (R400).
- **Tecnología de Comunicación:** LoRaWAN, RF Fija, RF Móvil, GPRS.
- **Ubicación del Medidor:** Por unidad habitacional, gabinete por piso, gabinete por edificio.

La matriz utiliza las siguientes variables:

- **Costo Medidor:** Valor referencial asignado al medidor (diferenciando entre dispositivos de alta sensibilidad, p. ej., medidor R400, y de menor sensibilidad, p. ej., medidor R315).
- **Medidor:** Tipo de dispositivo de medición empleado (M.1 para ultrasónicos y M.2 para volumétricos).
- **Sensibilidad:** Capacidad del medidor para detectar cambios pequeños en el caudal, codificada ordinalmente (P.1 para alta y P.2 para menor sensibilidad).
- **Costo por Infraestructura Hídrica:** Valor relativo según la complejidad de la instalación (E1: por unidad habitacional, E2: gabinete por piso, E3: gabinete por edificio).
- **Costo Comunicación:** Valor ordinal que integra costos fijos y operativos de la tecnología de comunicación.
- **Comunicación:** Modalidad de transmisión (se diferencian alternativas basadas en Radiofrecuencia, por ejemplo, RF Fija – Nube [RF.2], RF Móvil – Lecturador [RF.1], GPRS – Nube [C.3] y Comunicación LoRaWAN [C.1]).
- **Frecuencia de Lectura:** Intervalo de medición (F.1: diaria, F.2: mensual).
- **Seguridad:** Valor que indica el riesgo de manipulación, donde un valor menor denota mayor seguridad.
- **Configuración Recomendada:** La opción final sugerida, obtenida a partir del árbol de decisión que combina los valores ordinales asignados a cada criterio.

Descartes y restricciones:

- Se excluyeron los medidores mecánicos velocimétricos y aquellos con una sensibilidad inferior a 315, debido a que no cumplen con los estándares metrológicos requeridos para lograr mediciones precisas en edificaciones. Esta deficiencia en la precisión del registro de datos afecta la fiabilidad del monitoreo del consumo de agua, lo que resulta crítico en proyectos que demandan lecturas exactas y seguras.
- Se consideró que la calidad del agua es buena y no afecta los medidores seleccionados.
- Se desestimaron opciones de comunicación con altos costos que no se ajustan a la realidad local (NB-IoT).

Con esto, se definió una tabla de configuraciones (10 combinaciones) que serán evaluadas en la Matriz.

2.2.4 Construcción de la Matriz de Selección

Con los criterios y escalas definidos (Seguridad, Costo en Medición, Costo en Comunicación y Costo en Infraestructura Hídrica), se procedió a evaluar las configuraciones de tecnologías de medición y comunicación propuestas en la etapa anterior. Cada configuración (“Medidor Ultrasónico (R400) + LoRaWAN + Medidor por Unidad Habitacional” (0 %–100 %)” en cada uno de los cuatro criterios, según las tablas definidas.

Para la selección de configuraciones se definieron 10 combinaciones posibles, que varían en tipo de medidor (R315, R400), tecnología de comunicación (LoRaWAN, RF Fija, RF Móvil y GPRS) y ubicación del medidor (unidad habitacional, piso o edificio).

Se aplicaron los descartes indicados previamente (por ejemplo, no se consideraron medidores mecánicos ni NB-IoT, y se asumió calidad de agua controlada).

A cada configuración se le asignó un valor de Seguridad (0 %–100 %), Costo en Medición (0 %–100 %), Costo en Comunicación (0 %–100 %) y Costo en Infraestructura Hídrica (0 %–100 %), con base en las escalas presentadas.

Se construyó una matriz de decisión donde cada fila representa una configuración y cada columna uno de los criterios. Por ejemplo podría ser: “Config. 1: Medidor R315 + LoRaWAN + Medidor por Unidad Habitacional”

Se han diseñado 3 matrices según la Prioridad, si el usuario prioriza Precisión, la matriz puede mostrar, por ejemplo, cuál configuración tiene un medidor de mayor sensibilidad (R400). Si prioriza Seguridad, se identifican configuraciones con escala alta en ese criterio. Si prioriza Costo, se destacan las opciones con valores más altos (más favorables) en Costo en Medición, Costo en Comunicación e Infraestructura.

El resultado es una matriz estructurada que permite comparar de forma objetiva las 10 configuraciones, considerando los cuatro criterios estándar. El usuario puede, en primera instancia, ver qué combinación encabeza cada criterio individual.

2.2.5 Diseño de la Herramienta de Ponderación

Para dotar de flexibilidad a la matriz de selección y permitir al usuario ajustar la importancia de cada criterio a su realidad, se diseñó una herramienta de ponderación basada en la similitud del coseno. Este mecanismo va más allá de elegir una única prioridad, dando la posibilidad de asignar pesos en porcentaje (0 %–100 %) a los cuatro criterios (Seguridad, Costo en Medición, Costo en Comunicación e Infraestructura Hídrica).

a) Entrada de Datos por Parte del Usuario

El usuario define un vector de preferencias $\mathbf{p} = [p_{seg}, p_{med}, p_{com}, p_{hid}]$, donde cada componente es un porcentaje que indica la relevancia de ese criterio.

Por ejemplo, si el usuario valora un 50 % en Seguridad y un 25 % en los Costos, asignaría $\mathbf{p} = [50 \%, 25 \%, 25 \%, 25 \%]$.

b) Representación de Cada Configuración

Cada una de las 10 configuraciones se modela también como un vector $\mathbf{c}_i = [p_{seg}, p_{med}, p_{com}, p_{hid}]$, empleando los valores estandarizados (0 %–100 %) obtenidos en la matriz de selección.

c) Cálculo de la Similitud del Coseno

Para comparar la preferencia del usuario $\mathbf{p}$ con cada configuración $\mathbf{c}_i$, se utiliza la fórmula de similitud del coseno:

$$\text{Similitud}(\mathbf{p}, \mathbf{c}_i) = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{c}_i}{\|\mathbf{p}\| \cdot \|\mathbf{c}_i\|} \quad (2.2)$$

Un valor cercano a **1** indica que la configuración $\mathbf{c}_i$ es muy afín a las prioridades del usuario, mientras que un valor cercano a **0** refleja poca coincidencia.

d) Ranking de Configuraciones

Luego de calcular la similitud para cada configuración, la herramienta ordena las opciones de mayor a menor valor. El usuario obtiene así un ranking de las configuraciones que mejor se alinean con sus pesos asignados.

Como resultado se tiene una herramienta personalizada que integra la matriz de selección con un sistema de ponderación, ofreciendo recomendaciones totalmente adaptadas a las necesidades del proyecto de edificación en Guayaquil.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

En esta sección se exponen los productos principales obtenidos durante la investigación, que abarcan:

- a)** La matriz de selección de tecnologías de medición y comunicación, con tres variantes según la prioridad:
 - Prioridad Precisión
 - Prioridad Seguridad
 - Prioridad Costo
- b)** La herramienta de ponderación, que permite asignar pesos (en %) a los criterios (Seguridad, Costo en Medición, Costo en Comunicación e Infraestructura Hídrica) y obtener un ranking de configuraciones en función de la similitud del coseno.

Estos resultados responden a los Objetivos Específicos de la investigación, desarrollar una matriz de selección estructurada por prioridades (precisión, seguridad y costo) y Diseñar e implementar de una herramienta de ponderación que genere recomendaciones personalizadas.

3.1.1 Matrices de Selección

Luego de definir y normalizar las escalas (0 %–100 %) para cada criterio, se evaluaron las diez configuraciones de medición y comunicación en las tres matrices descritas a continuación. Cada matriz está orientada a una prioridad distinta, reflejando las necesidades más frecuentes en el control de consumos de agua en edificios verticales de Guayaquil.

El objetivo es favorecer la detección de caudales bajos, consumos intermitentes y la exactitud de la medición, aspectos que, en la práctica, inciden directamente en una distribución justa de los consumos. En ciudades como Guayaquil, los edificios suelen facturar un consumo comunal que resulta de la diferencia entre el medidor principal y las lecturas de los medidores individuales; así, una medición deficiente en los departamentos puede terminar diluyéndose entre todos los usuarios, sin que se identifique al verdadero responsable del consumo excedente.

Con ello en mente, se consideraron criterios como la sensibilidad del medidor, el costo del medidor, el tipo de comunicación, la frecuencia de lectura, el costo de comunicación, la ubicación del medidor, el costo por infraestructura hídrica y la seguridad. El resultado de las configuraciones con medidor de alta sensibilidad (R400) y comunicación LoRaWAN muestra puntajes elevados en la columna de “Precisión”, a pesar de su mayor costo inicial (0 % en Costo Medidor). Por otro lado, las configuraciones basadas en medidor volumétrico (R315) mantienen un puntaje alto (100 %) en “Costo Medidor”, aunque pueden presentar menor exactitud para caudales muy bajos (ver Tabla 3.1. Matriz de selección - prioridad precisión Tabla 3.1).

3.1.2 Matriz de Selección – Prioridad Precisión

El objetivo es favorecer la detección de caudales bajos, consumos intermitentes y la exactitud de la medición. Se considera criterios como la sensibilidad del medidor, costo del medidor, tipo de comunicación, frecuencia de lectura, costo de comunicación, ubicación del medidor, costo por infraestructura hídrica y seguridad.

El resultado son las configuraciones con medidor de alta sensibilidad (R400) y comunicación LoRaWAN obtienen elevados puntajes en la columna de “Precisión”, aun cuando su costo en medición pueda ser mayor (0 %).

Las configuraciones basadas en medidor volumétrico (R315) conservan un puntaje alto (100 %) en “Costo Medidor”, pero pueden presentar menor exactitud para caudales muy bajos. La Tabla 3.1. (ver más adelante) muestra la “Matriz de Selección – Prioridad Precisión”, donde cada configuración se evalúa y se sugiere una opción recomendada según un árbol de decisión basado en escalas ordinales.

Tabla 3.1. Matriz de selección - prioridad precisión

MATRIZ DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y COMUNICACIÓN - PRIORIDAD PRECISIÓN										
Prioridad	Sensibilidad	Medidor	Costo Medidor	Comunicación	Frecuencia de Lectura	Costo Comunicación	Ubicación del Medidor	Costo por Infraestructura Hídrica	Seguridad	Configuración Recomendada
1. Precisión	P.1. Mayor Sensibilidad	M.1. Medidor R400	0%	Comunicación LoRaWAN-RF - Nube	F.1. Diaria	100%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	100%	Configuración 1
	P.2. Menor Sensibilidad	M.2. Medidor R315	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	0%	Configuración 2
			100%			33%	E2. Gabinete por Piso	50%	17%	Configuración 3
			100%			33%	E3. Gabinete por Edificio	0%	33%	Configuración 4
			100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%	Configuración 5
			100%			67%	E2. Gabinete por Piso	50%	83%	Configuración 6
			100%			67%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%	Configuración 7
			100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%	Configuración 8
			100%			0%	E2. Gabinete por Piso	50%	67%	Configuración 9
			100%			0%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%	Configuración 10

Nota: Los valores asignados son escalas ordinales que indican la posición relativa de cada opción en el criterio evaluado. Por ejemplo, “1” representa la opción más favorable en términos de costo, mientras que valores mayores indican opciones menos favorables. Estos valores forman parte de un árbol de decisión que permite al usuario avanzar en la selección de la configuración óptima.

3.1.3 Matriz de Selección – Prioridad Seguridad

El objetivo es minimizar accesos no autorizados, manipulación indebida o riesgos de suplantación. Los criterios considerados son: seguridad, ubicación del medidor (unidad, piso, edificio), costo del medidor, comunicación y costo de comunicación, entre otros.

El resultado son configuraciones con ubicación E1 (por unidad habitacional) y comunicaciones sin lector (LoRaWAN o RF Fija) tienden a obtener mayores porcentajes en Seguridad.

Las configuraciones basadas en lector (RF Móvil) o con “gabinetes centralizados” pueden presentar valores más bajos (33 % o 0 %).

La configuración 1 (R400 + LoRaWAN + E1) aparece con un 100 % en Seguridad y se sugiere como “Configuración Recomendada”.

Otras opciones, como la Configuración 7 (R315 + RF Fija + Gabinete por Edificio), también destacan, aunque con menor puntaje en otros criterios (Costo Medidor).

La Tabla 3.2 presenta la “Matriz de Selección – Prioridad Seguridad”, en la que se asignan escalas ordinales a cada subcriterio para identificar la configuración que ofrece el menor riesgo de manipulación o acceso no autorizado.

Tabla 3.2. Matriz de selección - prioridad seguridad

MATRIZ DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y COMUNICACIÓN - PRIORIDAD SEGURIDAD												
Prioridad	Seguridad	Ubicación del Medidor	Costo Medidor	Comunicación	Frecuencia de Lectura	Costo Comunicación	Medidor	Sensibilidad	Costo por Infraestructura Hídrica	Configuración Recomendada		
2. Seguridad	100%	E1. Por Unidad Habitacional	0%	C.1. Comunicación LoRaWAN	F.1. Diaria	100%	M.1. Medidor R400	P.1. Precisión Alta	100%	Configuración 1		
	83%	E3. Gabinete por Edificio	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	M.2. Medidor R315	P.2. Precisión Baja	0%	Configuración 7		
		E3. Gabinete por Edificio		C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%				Configuración 10		
	67%	E2. Gabinete por Piso		RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%			50%	Configuración 6		
		E2. Gabinete por Piso		C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%				Configuración 9		
	50%	E1. Por Unidad Habitacional		RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%			100%	Configuración 5		
		E1. Por Unidad Habitacional		C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%				Configuración 8		
	33%	E3. Gabinete por Edificio		RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%			0%	Configuración 4		
	17%	E2. Gabinete por Piso							50%	Configuración 3		
	0%	E1. Por Unidad Habitacional							100%	Configuración 2		

Nota: Los valores asignados son escalas ordinales que indican la posición relativa de cada opción en el criterio evaluado. Por ejemplo, “1” representa la opción más favorable en términos de costo, mientras que valores mayores indican opciones menos favorables. Estos valores forman parte de un árbol de decisión que permite al usuario avanzar en la selección de la configuración óptima.

3.1.4 Matriz de Selección – Prioridad Costo

El objetivo es encontrar la combinación de medidor, ubicación y tecnología de comunicación con el menor costo total, sin desatender la precisión mínima y la seguridad básica. Los criterios considerados son el costo del medidor (R315 vs. R400), costo de la comunicación (LoRaWAN vs. GPRS vs. RF), costo en infraestructura hídrica y seguridad. El resultado son las configuraciones basadas en medidor R315 (100 %) y tecnologías de bajo costo (RF Fija, RF Móvil) obtienen puntajes altos en “Costo”.

La ubicación “unidad habitacional” (E1) generalmente disminuye el costo de infraestructura hidráulica, mientras aumenta la inseguridad.

En conjunto, estas matrices ofrecen un instrumento práctico para que constructores y gestores elijan la tecnología en función de la prioridad principal (Precisión, Seguridad o Costo). Sin embargo, muchas veces los proyectos requieren ponderar varios criterios simultáneamente; aquí surge la necesidad de la Herramienta de Ponderación (Ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Matriz de selección - prioridad costo

MATRIZ DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y COMUNICACIÓN - PRIORIDAD COSTO										
Prioridad	Costo Medidor	Medidor	Sensibilidad	Costo por Infraestructura Hídrica	Ubicación del Medidor	Costo Comunicación	Comunicación	Frecuencia de Lectura	Seguridad	Configuración Recomendada
3. Costo	100%	M.2. Medidor R315	P.2. Precisión Baja	100%	E1. Por Unidad Habitacional	67%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	50%	Configuración 5
						33%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	0%	Configuración 2
						0%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	50%	Configuración 8
				50%	E2. Gabinete por Piso	67%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	Configuración 6
						33%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	17%	Configuración 3
						0%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	67%	Configuración 9
				0%	E3. Gabinete por Edificio	67%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	83%	Configuración 7
						33%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	Configuración 4
						0%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	83%	Configuración 10
	0%	M.1. Medidor R400	P.1. Precisión Alta	100%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	C.1. Comunicación LoRaWAN	F.1. Diaria	100%	Configuración 1

Nota: Los valores asignados son escalas ordinales que indican la posición relativa de cada opción en el criterio evaluado. Por ejemplo, “1” representa la opción más favorable en términos de costo, mientras que valores mayores indican opciones menos favorables. Estos valores forman parte de un árbol de decisión que permite al usuario avanzar en la selección de la configuración óptima.

3.1.5 Herramienta de ponderación: casos de uso

Para permitir la combinación flexible de criterios, se diseñó una herramienta que asigna pesos (en %) a Seguridad, Costo en Medición, Costo en Comunicación e Infraestructura Hídrica, y luego calcula la similitud del coseno con cada configuración.

a) Vector de Preferencias

El usuario ingresa, por ejemplo, $p = [50 \%, 25 \%, 25 \%, 25 \%]$ si valora un 50 % la Seguridad y un 25 % cada uno de los tres costos (Medidor, Comunicación, Infraestructura).

Se normaliza este vector y se compara con las 10 configuraciones, cada una convertida también en un vector $c_i = [v_{seg}, v_{med}, v_{com}, v_{hid}]$.

b) Similitud del Coseno

La herramienta genera un ranking de mayor a menor valor de similitud, indicando qué configuración se ajusta mejor a los pesos asignados. De esta forma, si un usuario prioriza Seguridad y bajo Costo de Comunicación, la configuración con altos porcentajes en esos dos criterios escalará posiciones en el ranking final.

c) Casos de ejemplo

- **Caso 1:** Seguridad = 50 %, Costo Medidor = 25 %, Costo Comunicación = 25 %, Infraestructura = 25 %.
Configuración 6 (R315 + RF Fija + Gabinete por Piso) encabeza la lista con una similitud de ~ 0.9374 (ver Tabla 3.4).
- **Caso 2:** Seguridad = 100 %, Costo Medidor = 50 %, Costo Comunicación = 50 %, Infraestructura = 100 %.
Configuración 1 (R400 + LoRaWAN + E1) obtiene la mayor similitud (~ 0.9129), seguida de Configuración 5 (ver Tabla 3.5).
- **Caso 3:** Seguridad = 25 %, Costo Medidor = 100 %, Costo Comunicación = 25 %, Infraestructura = 50 %.
- La Configuración 3 se destaca con un valor de ~ 0.9950 , mientras que la Configuración 1 toma la última posición, puesto que la seguridad y el costo de comunicación no son relevantes (ver Tabla 3.6).

Estos ejemplos ilustran cómo la herramienta se adapta a escenarios diversos, ofreciendo un análisis más completo que las tres matrices independientes.

Tabla 3.4. Resultado del caso 1

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y COMUNICACIÓN											
DATOS DE ENTRADA											
Seguridad		50%	Costo Medidor		25%						
Costo Comunicación		25%	Costo por Infraestructura Hidráulica		25%	Elaborado por: Cabrera & Romero (2025)					
Ranking	Configuración Recomendada	Similitud entre Cosenos	Medidor	Sensibilidad	Costo Medidor	Comunicación	Frecuencia de Lectura	Costo Comunicación	Ubicación del Medidor	Costo por Infraestructura Hídrica	Seguridad
1	Configuración 6	0.9374	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E2. Gabinete por Piso	50%	83%
2	Configuración 1	0.8729	M.1. Medidor R400	P.1. Mayor Sensibilidad	0%	Comunicación LoRaWAN-RF - Nube	F.1. Diaria	100%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	100%
3	Configuración 7	0.8615	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%
4	Configuración 5	0.8443	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%
5	Configuración 9	0.8227	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E2. Gabinete por Piso	50%	67%
6	Configuración 10	0.7743	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%
7	Configuración 8	0.7559	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%
8	Configuración 3	0.6949	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E2. Gabinete por Piso	50%	17%
9	Configuración 4	0.6838	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E3. Gabinete por Edificio	0%	33%
10	Configuración 2	0.6070	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	0%

Tabla 3.5. Resultado del caso 2

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y COMUNICACIÓN											
DATOS DE ENTRADA											
Seguridad		100%	Costo Medidor		50%						
Costo Comunicación		50%	Costo por Infraestructura Hidráulica		100%	Elaborado por: Cabrera & Romero (2025)					
Ranking	Configuración Recomendada	Similitud entre Cosenos	Medidor	Sensibilidad	Costo Medidor	Comunicación	Frecuencia de Lectura	Costo Comunicación	Ubicación del Medidor	Costo por Infraestructura Hídrica	Seguridad
1	Configuración 1	0.9129	M.1. Medidor R400	P.1. Mayor Sensibilidad	0%	Comunicación LoRaWAN-RF - Nube	F.1. Diaria	100%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	100%
2	Configuración 5	0.8990	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%
3	Configuración 6	0.8866	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E2. Gabinete por Piso	50%	83%
4	Configuración 8	0.8433	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%
5	Configuración 9	0.8098	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E2. Gabinete por Piso	50%	67%
6	Configuración 2	0.7255	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	0%
7	Configuración 7	0.7207	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%
8	Configuración 3	0.7155	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E2. Gabinete por Piso	50%	17%
9	Configuración 10	0.6478	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%
10	Configuración 4	0.5721	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E3. Gabinete por Edificio	0%	33%

Tabla 3.6. Resultado del caso 3

HERRAMIENTA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y COMUNICACIÓN											
DATOS DE ENTRADA											
Seguridad		25%	Costo Medidor		100%						
Costo Comunicación		25%	Costo por Infraestructura Hidráulica		50%		Elaborado por: Cabrera & Romero (2025)				
Ranking	Configuración Recomendada	Similitud entre Cosenos	Medidor	Sensibilidad	Costo Medidor	Comunicación	Frecuencia de Lectura	Costo Comunicación	Ubicación del Medidor	Costo por Infraestructura Hídrica	Seguridad
1	Configuración 3	0.9950	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E2. Gabinete por Piso	50%	17%
2	Configuración 5	0.9308	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%
3	Configuración 2	0.9293	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	0%
4	Configuración 9	0.9281	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E2. Gabinete por Piso	50%	67%
5	Configuración 8	0.9239	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	50%
6	Configuración 4	0.9000	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.1. RF Movil - Lecturador	F.2. Mensual	33%	E3. Gabinete por Edificio	0%	33%
7	Configuración 6	0.8966	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E2. Gabinete por Piso	50%	83%
8	Configuración 7	0.8018	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	RF.2. RF Fija - Nube	F.1. Diaria	67%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%
9	Configuración 10	0.7916	M.2. Medidor R315	P.2. Menor Sensibilidad	100%	C.3. GPRS - Nube	F.2. Mensual	0%	E3. Gabinete por Edificio	0%	83%
10	Configuración 1	0.4924	M.1. Medidor R400	P.1. Mayor Sensibilidad	0%	Comunicación LoRaWAN-RF - Nube	F.1. Diaria	100%	E1. Por Unidad Habitacional	100%	100%

3.1.6 Hallazgos Principales

Los resultados evidencian que las tecnologías ultrasónicas (R400) combinadas con redes de comunicación LoRaWAN ofrecen la mayor precisión en la detección de caudales bajos y consumos intermitentes; sin embargo, implican un costo inicial más elevado frente a medidores volumétricos (R315). Aun así, los dispositivos R315, especialmente en conjunto con RF Fija o RF Móvil, se presentan como opciones más económicas, aunque pueden subestimar consumos reducidos.

En cuanto a la ubicación de los medidores, ubicar uno en cada unidad habitacional (E1) disminuye el costo de infraestructura hidráulica debido a la menor cantidad de tuberías, aunque la seguridad puede verse afectada por la accesibilidad de los Lecturadores. En contraste, los gabinetes comunes (por piso o por edificio) elevan el costo de tuberías y accesorios, pero permiten concentrar los equipos en espacios controlados y restringir el acceso, aportando una mayor seguridad.

Respecto a la comunicación, LoRaWAN se destaca por no generar cuotas mensuales, siendo la más favorable en costos operativos a largo plazo, mientras que GPRS, pese a requerir una inversión inicial menor, conlleva un gasto mensual y resulta menos rentable al proyectar los costos durante la vida útil del proyecto.

Las condiciones locales de Guayaquil, caracterizadas por edificios de gran altura, realzan la importancia de la micromedición (Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022) y la detección temprana de consumos anómalos. Con base en ello, la matriz de selección desarrollada, junto con la herramienta de ponderación, facilita un análisis personalizado al asignar diferentes pesos a criterios como costo, seguridad o precisión, generando recomendaciones ajustadas a las necesidades de cada proyecto.

3.2 Análisis de resultados y discusión

Los resultados expuestos en la sección de 3.1, tanto en las matrices de selección (Precisión, Seguridad y Costo) como en la herramienta de ponderación, evidencian la posibilidad de priorizar de manera diferenciada los criterios según las exigencias de cada proyecto. Este planteamiento coincide con las recomendaciones de (Arregui et al., 2020; Schumann et al., 2021), quienes señalan la necesidad de adaptar la tecnología de medición al contexto local, tomando en cuenta factores económicos (costo del medidor, costo operativo), técnicos (precisión, ubicación) y regulatorios (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2017).

En el eje de la precisión, la Configuración 1 (medidor R400 + LoRaWAN + E1) confirmó su eficacia para registrar caudales muy bajos, lo cual resulta crucial en edificaciones verticales con consumos intermitentes (Arregui et al., 2020). Sin embargo, dicha configuración presenta un costo inicial más elevado (0 % en “Costo Medidor”), tal como lo describen (Schumann et al., 2021) al comparar medidores ultrasónicos con soluciones volumétricas más económicas. Por ello, en proyectos que priorizan la eficiencia de costos, las configuraciones con medidor volumétrico R315 y comunicaciones RF Fija o RF Móvil (ver Configuraciones 2, 3, 5 o 6) obtienen un mejor balance inversión-operación, de acuerdo con la visión de (Fuentes & Mauricio, 2020).

Respecto a la seguridad, los datos sugieren que las opciones que minimizan la lectura física (p. ej., LoRaWAN o RF Fija sin lector) y ubican el medidor en la unidad habitacional (E1) reducen la probabilidad de manipulación indebida. Estos hallazgos corroboran las conclusiones de (Wingfield et al., 2021), al destacar que los entornos verticales incrementan el riesgo de acceso no autorizado, justificando el uso de tecnologías que permitan el corte remoto y la lectura en la nube (Carchi et al., 2023).

Por otro lado, la herramienta de ponderación —basada en la similitud del coseno— posibilita combinar varios criterios simultáneamente y proveer un ranking personalizado. Este enfoque se alinea con lo planteado por (Mileiko et al., 2021), quienes resaltan la importancia de contemplar tanto la inversión inicial como el costo de operación en estudios de factibilidad. Al asignar pesos en porcentaje a la seguridad o al costo de comunicación, el usuario puede variar el orden de las configuraciones recomendadas, adaptándose a escenarios de diferente disponibilidad presupuestaria, necesidades de precisión o niveles de seguridad requeridos.

Finalmente, estos resultados confirman la pertinencia de modernizar la micromedición en edificios nuevos de Guayaquil tal y como exige la (Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2022) y demuestran la viabilidad de una matriz de selección y de una herramienta de ponderación que integren criterios técnicos, económicos y de seguridad. Así, se facilita la toma de decisiones en concordancia con los Objetivos de Investigación, asegurando que la tecnología instalada responda a las demandas locales y contribuya a la sostenibilidad del recurso hídrico (Buytaert & Bievre, 2012a; Carchi et al., 2023).

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El presente estudio permitió diseñar una matriz de selección y una herramienta de ponderación que, de manera conjunta, brindan un marco de referencia para la toma de decisiones en la medición y comunicación de consumos de agua potable en edificios nuevos de Guayaquil. A partir de la comparación de medidores ultrasónicos y volumétricos, así como de los principales protocolos de comunicación (LoRaWAN, RF Fija, RF Móvil y GPRS), se integraron los criterios de precisión, seguridad y costo en escalas estandarizadas (0 %–100 %). Aunque no se realiza una demostración empírica, los resultados obtenidos refuerzan la idoneidad de configuraciones basadas en medidores ultrasónicos de alta

sensibilidad (R400) y comunicación LoRaWAN para detectar consumos intermitentes y caudales bajos, contribuyendo a reducir pérdidas no facturadas, en concordancia con estudios previos.

En términos de seguridad, las soluciones que eliminan la lectura física y ofrecen corte remoto surgen como las más adecuadas para entornos verticales, donde puede existir riesgo de suplantación de personal de la operadora. Respecto al equilibrio entre costos de inversión y operación, se confirma que, si bien GPRS demanda menos inversión inicial, sus cuotas mensuales lo vuelven menos atractivo a largo plazo en comparación con LoRaWAN o RF Fija.

La herramienta de ponderación, fundamentada en la similitud del coseno, brinda flexibilidad al permitir asignar pesos diferenciales a cada criterio, generando un ranking de configuraciones acorde con diversos escenarios de inversión, seguridad y precisión. Su replicabilidad en otros contextos o ciudades requiere únicamente la actualización de costos de mercado y condiciones regulatorias. No obstante, se recomienda llevar a cabo proyectos piloto que validen el funcionamiento de la matriz y la herramienta en condiciones operativas reales, a fin de recabar evidencia empírica que consolide su eficacia y precisión. De este modo, se promueve una gestión hídrica más eficiente y transparente, alineada con los principios de resiliencia urbana y los objetivos de sostenibilidad adoptados a nivel nacional e internacional.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda, realizar estudios de campo que validen empíricamente la eficacia de las configuraciones propuestas y la utilidad de la herramienta de ponderación en condiciones operativas reales de edificios nuevos en Guayaquil. Dichos estudios deberían incluir proyectos piloto que permitan evaluar la lectura y la transmisión de datos en entornos de alta verticalidad y ocupación diversa, considerando variables como la estabilidad de la red de comunicación, la influencia de la calidad del agua y la aceptación de los usuarios finales.

Con el propósito de brindar mayor flexibilidad, se aconseja ampliar las funcionalidades de la herramienta para incorporar límites presupuestarios específicos en cada criterio, de manera que los constructores o administradores puedan filtrar más eficazmente las configuraciones según su capacidad de inversión. También sería valioso examinar la viabilidad de integrar sensores

multiparamétricos de calidad del agua, a fin de disponer de información más detallada que contribuya a la detección de incidencias y a la toma de decisiones basadas en parámetros físico-químicos.

En una línea de investigación futura, se sugiere profundizar en la interfaz de usuario, desarrollando una aplicación o plataforma web que permita a constructores y gestores interactuar de forma intuitiva con la matriz de selección y la herramienta de ponderación. Asimismo, se recomienda establecer colaboraciones con la empresa operadora y autoridades reguladoras, de manera que se actualicen periódicamente las escalas de costos, la información sobre tecnologías emergentes y los requerimientos normativos. Esto aseguraría la pertinencia de la herramienta en un contexto de rápida evolución tecnológica e incentivaría su adopción generalizada para optimizar la gestión hídrica en edificios nuevos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA). (2017). *REGULACIÓN Nro. DIR-ARCA-RG-006-2017*. www.regulacionagua.gob.ve
- Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA). (2022). *REGULACIÓN Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022*.
- Alvisi, S., Casellato, F., Franchini, M., Govoni, M., Luciani, C., Poltronieri, F., Riberto, G., Stefanelli, C., & Tortonesi, M. (2019). Wireless middleware solutions for smart water metering. *Sensors (Switzerland)*, 19(8). <https://doi.org/10.3390/s19081853>
- Arregui, F. J., Pastor-Jabaloyes, L., Mercedes, A. V., & Gavara, F. J. (2020). Accuracy of solid-state residential water meters under intermittent flow conditions. *Sensors (Switzerland)*, 20(18). <https://doi.org/10.3390/s20185339>
- Beal, C. D., & Flynn, J. (2015). Toward the digital water age: Survey and case studies of Australian water utility smart-metering programs. *Utilities Policy*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.12.006>
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012a). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012b). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Carchi, D., Orellana, M., Martínez, A., & Segovia, J. (2023). Affordability and sustainability in the human right to water. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies, ahead-of-print(ahead-of-print)*. <https://doi.org/10.1108/JADEE-06-2023-0151>
- Costa, D. F., & Soares, A. K. (2020). A Smart Metering Program for Water Consumption Patterns Assessment: Case Study; Brasilia, Brazil. *World Environmental and Water Resources Congress 2020: Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis - Selected Papers from the Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2020*. <https://doi.org/10.1061/9780784482971.027>
- Cristiano, E., Biddau, P., Delogu, A., Gandolfi, M., Deidda, R., & Viola, F. (2024). Automatic Detection of Water Consumption Temporal Patterns in a Residential Area

- in Northern Italy. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03956-z>
- De Moura, M. R. F., De Lima Pereira, I. K., Da Silva, S. R., & Baptista, F. M. (2014). Measuring individual water consumption: An incentive to urban areas sustainability. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19 I.
- Di Nardo, A., Baquero Gonzalez, D., Baur, T., Bernini, R., Bodini, S., Capasso, S., Cascetta, F., Castaldo, F., Cocco, M., Cousin, P., D'Acunto, M., Di Leo, R., Della Ventura, B., Di Mauro, A., Di Natale, M., Di Virgilio, G., Doveri, M., El Mansouri, B., Germano, R., ... Wouters, H. (2018). *On-line Measuring Sensors for Smart Water Network Monitoring*. 3. <https://doi.org/10.29007/4fcr>
- Ethem Karadirek, I. (2020). An experimental analysis on accuracy of customer water meters under various flow rates and water pressures. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 69(1). <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.031>
- Feng, X., Zang, D., Yan, L., Xie, W., Zhu, H., Yin, X., & Xu, M. (2021). Design on smart water meter system based on Cloud Computing. *E3S Web of Conferences*, 237. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123704010>
- Fuentes, H., & Mauricio, D. (2020). Smart water consumption measurement system for houses using IoT and cloud computing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08535-4>
- González-Zeas, D., Rosero-López, D., Muñoz, T., Osorio, R., De Bièvre, B., & Dangles, O. (2022). Making thirsty cities sustainable: A nexus approach for water provisioning in Quito, Ecuador. *Journal of Environmental Management*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115880>
- Gurung, T. R., Stewart, R. A., Sharma, A. K., & Beal, C. D. (2014). Smart meters for enhanced water supply network modelling and infrastructure planning. *Resources, Conservation and Recycling*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.005>
- Hangan, A., Chiru, C. G., Arsene, D., Czako, Z., Lisman, D. F., Mocanu, M., Pahontu, B., Predescu, A., & Sebestyen, G. (2022). Advanced Techniques for Monitoring and Management of Urban Water Infrastructures—An Overview. In *Water (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/w14142174>
- Kroner, C., Akselli, B., Benková, M., Borchling, A., Büker, O., Christoffersen, N., Pavlas, J., Schumann, D., Seypka, V., Ünsal, B., & Warnecke, H. (2022). Evaluation of the measurement performance of water meters depending on water quality. *Water Supply*, 22(4). <https://doi.org/10.2166/ws.2022.133>

- Lanza, L. (2022). *Dynamic Response of Water Meters Used for Potable Water*. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022021031>
- Li, X. J., & Chong, P. H. J. (2019). Design and implementation of a self-powered smart water meter. *Sensors (Switzerland)*, 19(19). <https://doi.org/10.3390/s19194177>
- Makropoulos, C., Kossieris, P., Kozanis, S., Katsiri, E., & Vamvakeridou-Lyroudia, L. (2014). From smart meters to smart decisions: web-based support for the water efficient household. *11th International Conference on Hydroinformatics, August*.
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., & Arce, S. X. M. (2017). Simultaneous Calibration of Leakages, Demands and Losses from Measurements. Application to the Guayaquil Network (Ecuador). *Procedia Engineering*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.237>
- Mileiko, S., Cetinkaya, O., Yakovlev, A., & Balsamo, D. (2021). A non-intrusive ultrasonic sensor system for water flow rate measurement. *2021 IEEE Sensors Applications Symposium, SAS 2021 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530165>
- Muhammetoglu, A., Albayrak, Y., Bolbol, M., Enderoglu, S., & Muhammetoglu, H. (2020). Detection and Assessment of Post Meter Leakages in Public Places Using Smart Water Metering. *Water Resources Management*, 34(9). <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02598-1>
- Ntambara, B., Blasius, N., Nyambo, D. G., Kipketer, D., & Ally, M. (2023). A novel and intelligent GSM-based smart prepaid water meter: A case of rural/urban areas in Arusha, Tanzania. *IEEE Potentials*, 42(4). <https://doi.org/10.1109/MPOT.2023.3262908>
- Ortiz, N., González, L., & Saldarriaga, J. (2022). Impact on Potable Water Consumption Due to Massive Migrations: The Case of Bogotá, Colombia. *Water (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/w14243987>
- Palermo, S. A., Maiolo, M., Brusco, A. C., Turco, M., Pirouz, B., Greco, E., Spezzano, G., & Piro, P. (2022). Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. In *Sensors* (Vol. 22, Issue 16). <https://doi.org/10.3390/s22166225>
- Pimenta, N., & Chaves, P. (2021). Study and design of a retrofitted smart water meter solution with energy harvesting integration. *Discover Internet of Things*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-021-00010-x>
- Profiroi, C. M., Bodislav, D. A., Burlacu, S., & Rădulescu, C. V. (2020). Challenges of sustainable urban development in the context of population growth. *European*

- Rizzo, E. B., Cousin, F. A., Lucca, R. M., & Lautenschlager, S. R. (2021). Autonomous metering system for monitoring water consumption. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(6). <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.049>
- Schumann, D., Kroner, C., Unsal, B., Haack, S., Kondrup, J. B., Christophersen, N., Benková, M., & Knotek, S. (2021). Measurements of water consumption for the development of new test regimes for domestic water meters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101963>
- Sousa, V., Silva, C. M., & Meireles, I. (2019). Performance of water efficiency measures in commercial buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.013>
- Tavares, S. A. C., Cavalcanti, R. J. B. V. M., Silva, D. R. C., Nogueira, M. B., & Rodrigues, M. C. (2018). Telemetry for Domestic Water Consumption Based on IOT and Open Standards. *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/METROI4.2018.8428333>
- Visser, M., Booysen, M. J., Brühl, J. M., & Berger, K. J. (2021). Saving water at Cape Town schools by using smart metering and behavioral change. *Water Resources and Economics*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2020.100175>
- Wingfield, S., Martínez-MoscOSO, A., Quiroga, D., & Ochoa-Herrera, V. (2021). Challenges to water management in ecuador: Legal authorization, quality parameters, and socio-political responses. *Water (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/w13081017>