

DOI: 10.24850/j-tyca-18-03-03

Artículos

Desafíos invisibles: una revisión de revisiones sobre la crisis del agua no contabilizada

Invisible challenges: an umbrella review of non-revenue water crisis

Genoveva Espinoza¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2347-9507>

Jorge Huacho², ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7649-6780>

¹Universidad Andina Simón Bolívar-Sede Ecuador, Quito, Ecuador,
genoveva.espinoza@uasb.edu.ec

²Universidad Andina Simón Bolívar-Sede Ecuador, Quito, Ecuador,
jorge.huacho@uasb.edu.ec

Autora para correspondencia: Genoveva Espinoza,
genoveva.espinoza@uasb.edu.ec

Resumen

El agua no contabilizada (ANC) representa un desafío estructural en la gestión de sistemas de distribución de agua potable, con implicaciones técnicas, financieras, ambientales e institucionales que comprometen la



eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas. Mediante una revisión de revisiones (*umbrella review*), esta investigación identifica las estrategias propuestas en la literatura para reducir los impactos del ANC. Los resultados muestran que dichas estrategias se articulan en torno a dos categorías: pérdidas reales (fugas en la red) y pérdidas aparentes (errores de medición, fraudes y consumos no autorizados). La evidencia reciente apunta a un desplazamiento hacia tecnologías de monitoreo en tiempo real y modelación hidráulica para la detección temprana de fugas, así como la necesidad de fortalecer la gestión de activos e integrar principios de sostenibilidad en el diseño de las intervenciones. Se concluye que el comportamiento del usuario, la gobernanza del agua y la sostenibilidad financiera de las empresas prestadoras son factores determinantes para garantizar resultados sostenidos en la reducción del ANC.

Palabras clave: distribución del agua, servicio de utilidad pública, agua potable, gestión de los recursos hídricos, conservación del agua, vigilancia, estudio bibliográfico, agua no contabilizada, ANC.

Abstract

Non-revenue water (NRW) represents a structural challenge in the management of drinking water distribution systems, with technical, financial, environmental, and institutional implications that undermine operational efficiency and strategic decision-making. Through an umbrella review methodology, this study identifies the strategies proposed in the literature to reduce the impacts of NRW. The results show that these strategies fall into two main categories: real losses (physical leakage from the network) and apparent losses (metering errors, fraud, and

unauthorized consumption). Recent evidence points to a shift toward real-time monitoring technologies and hydraulic modeling for early leak detection, as well as the need to strengthen asset management and integrate sustainability principles into the design of interventions. It is concluded that user behavior, water governance, and the financial sustainability of service providers are determining factors in achieving lasting results in NRW reduction.

Keywords: water distribution, public services, drinking water, water resources management, water conservation, monitoring, literature reviews, non-revenue water, NRW.

Recibido: 22/01/2026

Aceptado: 12/08/2026

Publicado *ahead of print*: 22/09/2026

1. Introducción

La gestión integral del recurso hídrico constituye un desafío estructural de las agendas contemporáneas de sostenibilidad, particularmente en entornos urbanos donde la demanda se intensifica de forma sostenida mientras la infraestructura de distribución de agua potable acumula signos de deterioro y obsolescencia. En este escenario, el agua no contabilizada (ANC) representa una amenaza crítica tanto para la sostenibilidad operativa de las redes de suministro como para la equidad en el acceso al recurso hídrico. El ANC comprende pérdidas reales (fugas en tuberías, roturas y conexiones defectuosas), y pérdidas aparentes (errores de medición, fraudes, subregistros y consumos no autorizados).

A estas categorías se suman las deficiencias estructurales de los sistemas de información de las empresas prestadoras, que con frecuencia carecen de catastros hídricos actualizados y acumulan errores sistemáticos. A ello se añade la escasa coordinación entre las áreas técnicas, administrativas y comerciales, producto de barreras institucionales y de gobernanza que dificultan una gestión verdaderamente integrada. En consecuencia, abordar el ANC exige no solo detectar pérdidas reales o aparentes, sino transformar el modelo de gestión del agua mediante un enfoque que articule a las empresas públicas, el control financiero, las áreas técnicas de infraestructura e ingeniería y la participación comunitaria.

Estudios recientes estiman que el volumen mundial de agua no contabilizada alcanza aproximadamente 126 mil millones de metros cúbicos al año, lo que representa cerca de USD 39 mil millones; reducirlo en apenas un tercio permitiría liberar suficiente agua para abastecer a aproximadamente 800 millones de personas (Liemberger & Wyatt, 2019). En países desarrollados, estas pérdidas ascienden a 22,7 mil millones de litros por día, mientras que en países en vías de desarrollo alcanzan los 45 millones de metros cúbicos diarios (Van den Berg & Danilenko, 2017). Esta problemática no refleja únicamente ineficiencias técnicas, sino también debilidades en la gestión del recurso hídrico, con implicaciones directas para la gobernanza del agua, la planificación urbana y la cultura ciudadana en torno al consumo hídrico.

Desde un enfoque sistémico, el ANC afecta a todas las dimensiones del desarrollo sostenible. En la dimensión ambiental, intensifica la extracción de recursos naturales y eleva el consumo energético asociado al tratamiento y distribución del agua, contribuyendo indirectamente al cambio climático. En la dimensión social, agrava las inequidades en el acceso al recurso, especialmente en sectores vulnerables donde el

servicio es intermitente o de baja calidad, vulnerando el derecho humano al agua. En la dimensión económica, erosiona la rentabilidad de las empresas proveedoras y compromete su sostenibilidad financiera. Desde la gobernanza, debilita la capacidad institucional para garantizar una provisión equitativa del servicio; y desde una perspectiva institucional más amplia, limita la formulación de políticas públicas basadas en evidencia, dado el déficit de información confiable y la ausencia de marcos comparativos estandarizados.

En las últimas décadas se ha consolidado un creciente cuerpo de literatura académica sobre estrategias para mitigar el ANC, que abarca tecnologías de detección de fugas, modelación hidráulica, sistemas de monitoreo inteligente, fortalecimiento institucional y participación comunitaria. Sin embargo, los estudios suelen circunscribirse a casos específicos y carecen de una integración conceptual o metodológica que articule las dimensiones técnica, ambiental, social y política del fenómeno, lo que impide identificar patrones, brechas y buenas prácticas transferibles a otros contextos (Farah & Shahrour, 2024; Callejas Moncaleano et al., 2021; Forero-Ortiz et al., 2023). Esta fragmentación dificulta la construcción de marcos comparativos robustos y la evaluación del impacto de las intervenciones implementadas en realidades diversas.

Ante este panorama, resulta necesario desarrollar revisiones sistemáticas de literatura que sinteticen la evidencia disponible y ofrezcan información catalogada y actualizada para orientar la toma de decisiones en política pública sobre gestión integral del recurso hídrico.

Por tanto, este artículo propone una revisión de revisiones (*umbrella review*) de investigaciones sistemáticas previas sobre estrategias para reducir el ANC, con el objetivo de identificar, analizar y clasificar las

prácticas más efectivas en torno a la reducción de pérdidas reales y aparentes en sistemas de distribución de agua potable.

1.1. Bases conceptuales para el análisis del ANC

La Asociación Internacional del Agua define el ANC como la diferencia entre el volumen de agua potable que ingresa al sistema y el volumen efectivamente facturado a los usuarios, abarcando tanto las pérdidas físicas (fugas y roturas) como las pérdidas aparentes (errores de medición, consumos ilegales o no registrados y fraudes), además de los consumos autorizados no facturados (International Water Association [IWA], 2013). La reducción del ANC depende de la capacidad operativa, técnica y financiera de las empresas encargadas del suministro, e involucra procesos de planificación, monitoreo, diagnóstico de fugas, incorporación de tecnología y mejora continua de los procesos.

Desde el enfoque del desarrollo sostenible, el estudio del ANC se enmarca en la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2015), específicamente en el ODS 6, que establece el compromiso de "garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos". El análisis de las estrategias de reducción del ANC contribuye a la consecución de metas concretas de este objetivo, como el acceso equitativo al agua (ODS 6.1), el aumento de la eficiencia en el uso de los recursos hídricos (ODS 6.4) y el mejoramiento de la gestión integral del recurso hídrico (GIRH) y la resiliencia de los sistemas de abastecimiento.

El estudio del ANC trasciende la gestión operativa de las empresas prestadoras: fortalece la seguridad hídrica y la resiliencia urbana frente al cambio climático, el crecimiento poblacional y la presión creciente sobre las fuentes de agua. Asimismo, constituye un punto de encuentro entre

la ingeniería, la economía y las ciencias sociales, al abrir la posibilidad de alinear la gestión técnica con los principios de equidad, sostenibilidad y participación ciudadana que son ejes centrales de la GIRH.

En la dimensión ambiental, el ANC ejerce una presión innecesaria sobre las fuentes hídricas. La extracción, tratamiento y distribución de agua que no llega efectivamente al usuario implica un consumo energético injustificado que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y al cambio climático (Hoekstra et al., 2017), comprometiendo la disponibilidad futura del recurso en contradicción directa con los principios de sostenibilidad (Kollmuss & Agyeman, 2002; Wu et al., 2020).

Las implicaciones sociales del ANC son igualmente críticas. La confianza en las instituciones proveedoras de servicios básicos incide directamente en los hábitos de consumo hídrico (Markey-Towler, 2019): en contextos de debilidad regulatoria y operativa, los usuarios perciben un escaso control sobre el recurso, lo que desincentiva comportamientos de ahorro (Khair et al., 2019). A su vez, el ANC deteriora la imagen institucional de los prestadores de servicios. Las pérdidas recurrentes y la operación bajo esquemas de intermitencia generan estrés hídrico urbano, vulnerabilidad sanitaria y una carga económica adicional para los hogares, que deben recurrir a soluciones alternativas —como cisternas o almacenamiento doméstico— frecuentemente precarias o contaminantes, con los consiguientes riesgos para la salud y la calidad de vida de la población (Guevara Pérez De La Torre, 2019). Este impacto recae de forma desproporcionada sobre las comunidades periurbanas y marginales, agudizando las brechas sociales existentes.

En la dimensión económica, el ANC amenaza directamente la viabilidad financiera de las empresas proveedoras de agua. Los niveles elevados de pérdidas distorsionan los cálculos de demanda real, lo que

deriva en sobredimensionamientos de infraestructura y costos operativos innecesarios (Benito et al., 2019; Manouseli et al., 2019). La ausencia de datos precisos impide, además, la formulación de planes estratégicos robustos y limita la capacidad institucional para responder a la escasez y al incremento de la demanda, con consecuencias que incluyen pérdidas directas de ingreso, presión sobre la sostenibilidad financiera y transferencia de costos a los usuarios (Kanakoudis & Gonelas, 2016).

La clasificación del ANC, normalizada por la IWA, distingue dos tipos fundamentales de pérdidas. Las pérdidas reales comprenden las pérdidas físicas del sistema presurizado —roturas, fugas y defectos en las redes de distribución— hasta el punto de medición del consumo del cliente (Alegre et al., 2016). El volumen perdido depende de la frecuencia, el caudal y la duración media de cada evento; y aunque las pérdidas físicas que ocurren aguas abajo del punto de medición quedan excluidas del cómputo formal, suelen ser significativas —especialmente en ausencia de medidores individuales— y deben considerarse en la gestión de la demanda. Las pérdidas aparentes, en cambio, no implican una pérdida física del sistema: corresponden a volúmenes de agua que se consumen pero que el gestor no registra ni controla, como ocurre con las conexiones ilegales, los errores de medición en contadores y los usos no autorizados (Yi et al., 2017; Ziegler et al., 2011). A estas dos categorías se añade el consumo autorizado no facturado, que engloba el agua utilizada por la propia empresa para fines operativos, el suministro para extinción de incendios y el agua proporcionada gratuitamente a determinados grupos de consumidores (Frauendorfer & Liemberger, 2010).

La detección eficaz de fugas es fundamental tanto para la eficiencia operativa como para la mitigación de impactos ambientales. Las fugas provocan una extracción innecesaria de agua que agota recursos vitales

—ríos y acuíferos—, agravando la escasez hídrica en regiones vulnerables, e incrementan el consumo energético para el tratamiento y distribución del agua, lo que eleva la huella de carbono de las empresas prestadoras (Farouk et al., 2023a). En sentido inverso, gestionar activamente las fugas contribuye a la sostenibilidad al conservar los recursos hídricos, reducir el desperdicio energético, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y prevenir la erosión del suelo y la degradación de la infraestructura (Farah & Shahrour, 2024).

Pese al reconocimiento de su impacto, los estudios sistemáticos sobre el ANC son aún escasos, especialmente en América Latina. Existe una necesidad urgente de integrar conocimientos fragmentados y metodologías dispersas en una agenda común de investigación que aborde tanto los aspectos técnicos como los institucionales y sociales. En particular, faltan estudios que examinen la relación entre el ANC y la gobernanza local, los mecanismos de rendición de cuentas, la participación ciudadana y las tecnologías de monitoreo inteligente, articulando las dimensiones técnica, social, ambiental y política del fenómeno.

2. Materiales y métodos

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo con un diseño metodológico de revisión de revisiones (*umbrella review*), estrategia que permite integrar y analizar de forma sistemática los hallazgos provenientes de múltiples revisiones sistemáticas y metaanálisis sobre un mismo fenómeno. Este tipo de revisión ofrece una visión panorámica que facilita la identificación de patrones, vacíos teóricos y posibles líneas futuras de investigación (Bonczar et al., 2023), y tiene como objetivo

generar una “imagen panorámica de los resultados y de las posibles direcciones que de ellos se deriven”, integrando enfoques cuantitativos y cualitativos (Hernández-González et al., 2023, pág. 14). Cabe señalar que los resultados de las revisiones sistemáticas y los metaanálisis pueden diferir considerablemente, dado que analizan un mismo fenómeno desde perspectivas metodológicas o conceptuales distintas, lo que puede generar conclusiones discordantes. En este contexto, la revisión de revisiones permite recopilar, sintetizar y armonizar los hallazgos disponibles, aportando mayor claridad y reduciendo las inconsistencias presentes en la literatura (Bonczar et al., 2023).

Para la ejecución del diseño metodológico se siguieron las guías propuestas por Pollock et al. (2023) y Aromataris & Munn (2020), que establecen que el proceso debe estructurarse en las fases que se detallan a continuación, proceso que garantiza la transparencia, la reproducibilidad y el rigor científico en cada etapa, especialmente en la documentación de los artículos seleccionados.

A. Formulación de la pregunta de investigación. La pregunta que orientó el estudio fue: ¿Qué estrategias, identificadas en revisiones sistemáticas y metaanálisis, permiten reducir los impactos técnicos, sociales, económicos, políticos y ambientales generados por el ANC, en el contexto de la sostenibilidad, la eficiencia hídrica y la gestión ambiental?

B. Criterios de inclusión y exclusión. La búsqueda principal se realizó en la base de datos Scopus, seleccionada por su calidad, rigurosidad, alto impacto y amplia cobertura multidisciplinaria.

Con el fin de extender el alcance y reducir el riesgo de sesgo por omisión, se complementó con Google Académico, que ofrece una cobertura de literatura académica significativamente más amplia que

bases tradicionales como Scopus y Web of Science (Martín-Martín et al., 2021). Esta combinación de fuentes contribuyó a conformar un corpus de literatura completo y representativo del fenómeno estudiado. Con el fin de garantizar la pertinencia, la calidad metodológica y la trazabilidad de la evidencia analizada, se establecieron criterios de inclusión y exclusión explícitos, aplicados de forma sistemática a lo largo de todo el proceso de cribado. La definición de estos criterios siguió las recomendaciones de Aromataris & Munn (2020) y Pollock et al. (2023) para revisiones paraguas, así como los principios PRISMA 2020, (Page et al., 2021) para la transparencia metodológica en revisiones de evidencia secundaria. Los criterios de inclusión se estructuraron en cinco dimensiones: *tipo de documento*: se incluyeron exclusivamente revisiones sistemáticas de literatura, revisiones bibliométricas, revisiones de alcance, revisiones críticas y metaanálisis. Esta delimitación es coherente con la naturaleza del diseño *umbrella review*, que sintetiza evidencia de segundo orden (Bonczar et al., 2023; Aromataris & Munn, 2020); *pertinencia temática*: los artículos debían abordar de manera central al menos una de las siguientes dimensiones del ANC: estrategias de reducción de pérdidas reales (fugas), estrategias de reducción de pérdidas aparentes (errores de medición, fraudes, consumos no autorizados), gestión de activos en redes de distribución o indicadores de desempeño asociados al ANC; *calidad de la fuente*: los documentos debían provenir de revistas científicas indexadas con revisión por pares; *período de publicación*: se delimitó la búsqueda al período 2013–2026, criterio que abarca la consolidación de la metodología IWA y la emergencia de tecnologías de monitoreo inteligente, captando así la literatura más relevante para el estado actual del campo; *idioma*: se incluyeron únicamente publicaciones en inglés, idioma predominante en la difusión internacional de

investigación de alto impacto en el área del ANC (Martín-Martín et al., 2021).

Los criterios de exclusión se aplicaron de manera complementaria y comprendieron: tesis, libros, capítulos de libros, ponencias, actas de congreso y literatura gris (artículos empíricos primarios, estudios de caso individuales y comunicaciones cortas que no constituyeran síntesis sistemática de evidencia; artículos editoriales, comentarios y cartas al editor); revisiones cuyo objeto de estudio principal no estuviera vinculado directamente al ANC, en sistemas de distribución de agua potable, registros duplicados entre las dos fuentes consultadas; artículos sin acceso al texto completo tras agotar los canales institucionales de obtención; y, artículos que no estaban en el área de conocimiento de Ciencia Ambiental, Ciencia Social, Ciencias de la Tierra y Planetarias, Ingeniería y Multidisciplinaria.

C. Búsqueda sistemática de artículos de revisión y metaanálisis. La búsqueda se llevó a cabo durante el mes de diciembre 2025 mediante cadenas de búsqueda que combinaron descriptores normalizados y términos libres en inglés, lo que facilitó la consistencia terminológica y la comparabilidad de los resultados. Se emplearon operadores booleanos (AND, OR) y truncamientos conforme a las normas de cada fuente, articulando conceptos centrales como *non-revenue water*, *real losses*, *apparent losses*, *water distribution systems* y *reduction strategies*. La cadena inicial fue: "non-revenue water" OR "real losses" OR "apparent losses" AND "systematic review".

Para validar esta cadena, se empleó ChatGPT (OpenAI, 2025) con el propósito de verificar su coherencia y pertinencia, e identificar posibles sinónimos y términos relacionados que optimizaran la recuperación de estudios relevantes. Las sugerencias generadas fueron revisadas

críticamente por el equipo investigador antes de su aplicación, garantizando que la herramienta actuó como complemento y no como sustituto del juicio académico. Asimismo, se utilizó inteligencia artificial para la corrección de estilo, gramática y sintaxis del presente manuscrito, con revisión posterior del equipo autor para asegurar la precisión conceptual y la coherencia académica del texto.

La cadena validada para Scopus fue: TITLE-ABS-KEY ("non-revenue water" OR "non-revenue water" OR "water loss" OR "water losses" OR "unaccounted-for water" OR "unaccounted for water" OR "water leakage" OR "water leakages" OR ("real losses" AND water) OR ("apparent losses" AND water)) AND TITLE-ABS-KEY ("umbrella review" OR "overview of reviews" OR "review of reviews" OR "systematic review" OR "meta-analysis" OR "meta-analysis" OR "scoping review"). Para Google Académico se utilizó: allintitle: ("non-revenue water" OR "non-revenue water" OR "water loss" OR "water losses" OR "unaccounted-for water" OR "water leakage") "systematic review" OR "umbrella review" OR "meta-analysis".

D. Selección de estudios. El proceso de selección se realizó siguiendo un flujo de cribado en cuatro fases consecutivas, conforme al modelo PRISMA 2020 adaptado a revisiones paraguas (Page et al., 2021; Pollock et al., 2023).

Cada fase incluyó una reducción justificada del corpus, con registro detallado de los motivos de exclusión, lo que garantiza la reproducibilidad del proceso.

a. identificación: La búsqueda inicial arrojó 268 registros: 246 procedentes de Scopus y 22 de Google Académico. Estos registros fueron exportados al gestor bibliográfico Zotero, que permitió la

organización, anotación y trazabilidad de cada documento a lo largo del proceso. La amplia diferencia de volumen entre ambas fuentes refleja el carácter más selectivo de Scopus —que privilegia publicaciones indexadas con revisión por pares— frente a la cobertura abierta y heterogénea de Google Académico, lo cual justifica su uso complementario para mitigar sesgos de omisión (Martín-Martín et al., 2021).

b. eliminación de duplicados: Mediante la función automática del gestor bibliográfico, complementada con verificación manual, se identificaron y eliminaron más de treinta registros duplicados entre ambas fuentes, así como duplicados internos derivados de variaciones en la indexación. El número elevado de duplicados se explica por el solapamiento natural entre Scopus y Google Académico, dado que la mayoría de las revistas indexadas en Scopus son también rastreadas por Google Scholar. Tras esta depuración, el corpus quedó conformado por aproximadamente 235 registros únicos.

c. cribado por título, resumen y palabras clave: cada registro único fue evaluado mediante la lectura conjunta de título, resumen y palabras clave, aplicando los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. La principal causa de exclusión en esta fase fue el tipo de estudio: la mayoría de los documentos identificados correspondían a investigaciones empíricas primarias, estudios de caso individuales o comunicaciones cortas que, aunque temáticamente afines al ANC, no constituían síntesis sistemática de evidencia y, por tanto, no cumplían el requisito metodológico esencial del diseño *umbrella review*. En menor medida, se excluyeron también documentos cuyo objeto de estudio se

desplazaba hacia temáticas hídricas adyacentes (agua residual, calidad del agua, desalinización) sin abordar centralmente las pérdidas en redes de distribución. La evaluación fue realizada de forma independiente por cada integrante del equipo investigador y, en los casos de discrepancia, los registros fueron sometidos a discusión hasta alcanzar consenso, siguiendo el procedimiento recomendado por Aromataris & Munn (2020) para minimizar el sesgo de selección. Esta fase redujo el corpus a 25 artículos elegibles para evaluación de texto completo.

d. evaluación de texto completo y elegibilidad final: los 25 artículos preseleccionados fueron sometidos a lectura íntegra de su texto, con el fin de verificar el cumplimiento sustantivo de los criterios de inclusión. En esta fase se excluyeron siete artículos adicionales que, pese a presentar un título o un resumen prometedores, no cumplían en su desarrollo con los estándares mínimos de revisión sistemática (por ejemplo, ausencia de protocolo de búsqueda explícito, falta de criterios de inclusión documentados o ausencia de un proceso reproducible de síntesis), o cuyo aporte al fenómeno del ANC resultó marginal una vez analizado el texto completo. Tras esta evaluación final, se conformó la muestra analítica definitiva de 18 artículos, sobre la cual se aplicó posteriormente el análisis de calidad metodológica mediante el instrumento AMSTAR-2 adaptado para revisiones no clínicas.

La conformación final de 18 revisiones no debe interpretarse como una muestra reducida, sino como el resultado esperable de un diseño de revisión de revisiones aplicado con criterios de inclusión deliberadamente restrictivos. A diferencia de una revisión sistemática de estudios primarios —donde el tamaño muestral condiciona la potencia estadística—, en una

umbrella review la unidad de análisis es la evidencia de segundo orden, de modo que la suficiencia del corpus se determina por su exhaustividad y por la cobertura del universo de revisiones existentes, y no por su volumen absoluto (Aromataris & Munn, 2020; Pollock et al., 2023). Las 18 revisiones incluidas sintetizan, a su vez, varios centenares de estudios primarios, lo que confiere al análisis una base de evidencias amplia pese al número acotado de unidades de segundo orden. La restricción del corpus responde a decisiones metodológicas explícitas y trazables — limitación a síntesis de evidencia revisadas por pares, foco temático estricto en las pérdidas en redes de distribución y exclusión sistemática de literatura primaria y gris— y no a una selección arbitraria: el propio flujo PRISMA documenta que la reducción de 268 registros iniciales a 18 estudios obedece mayoritariamente a la exclusión de investigaciones primarias que, aun siendo temáticamente afines al ANC, no constituyen síntesis sistemática de evidencia. Finalmente, la convergencia temática observada entre las revisiones —que reiteran de forma consistente los mismos ejes de detección de fugas, gestión de activos, sostenibilidad financiera y gobernanza— indica que se alcanzó un umbral de saturación en el que la incorporación de nuevas revisiones habría aportado rendimientos marginales decrecientes, criterio de suficiencia ampliamente reconocido en la síntesis cualitativa de evidencia.

E. Evaluación de la calidad metodológica. Para valorar el rigor de los artículos incluidos, se aplicó una versión adaptada del instrumento AMSTAR-2, ajustado a revisiones no clínicas.

La adaptación consideró cuatro elementos metodológicos centrales: la exhaustividad de la estrategia de búsqueda bibliográfica, la minimización del sesgo de selección, la transparencia en los criterios y el proceso de selección de artículos, y la declaración explícita de conflictos

de interés. Este proceso de evaluación permitió no solo asegurar un umbral mínimo de calidad en la evidencia sintetizada, sino también identificar las debilidades metodológicas recurrentes en el corpus analizado, aspecto que se desarrolla en la sección de resultados.

F. Síntesis de resultados. Para la organización y sistematización de la información extraída, se adaptó la matriz de análisis de textos propuesta por Apolo et al. (2018), instrumento que permitió estructurar la revisión de cada artículo en torno a cinco dimensiones analíticas: *objetivo del estudio*: ¿qué pregunta o propósito orientó la revisión sistemática o el metaanálisis?; *diseño metodológico*: ¿qué enfoque se utilizó —revisión sistemática de literatura, metaanálisis, bibliometría, entre otros—?; *contexto geográfico o institucional*: ¿en qué países, regiones o tipos de empresas se sustentaron los estudios?; *estrategias metodológicas*: ¿cómo se recopilaron y analizaron los datos?, ¿se emplearon indicadores IWA, tecnologías IoT, modelación hidráulica u otras herramientas?; y, *hallazgos clave y propuestas*: ¿qué resultados se reportaron en torno a pérdidas reales, pérdidas aparentes, eficiencia hídrica, gobernanza o sostenibilidad?

3. Presentación y discusión de resultados

La búsqueda sistemática permitió identificar 18 artículos publicados entre 2020 y 2026 que abordan estrategias para la reducción del ANC en sistemas de distribución de agua potable. Cada uno de estos estudios fue organizado y evaluado mediante la matriz analítica descrita en la sección de metodología, la cual integra las dimensiones técnica, institucional, social, política y ambiental, posibilitando una lectura transversal y comparativa de los hallazgos.

Tabla 1. Síntesis de los estudios seleccionados.

No	Nombre del artículo	Enfoque principal	Palabras claves	Referencia Bibliográfica	Año
1	Non-revenue water reduction strategies: a systematic review	Sostenibilidad	Sustainable development	Farouk, A. M., Rahman, R. A., & Romali, N. S. (2023). Non-revenue water reduction strategies: A systematic review. <i>Smart and Sustainable Built Environment</i> , 12(1), 181–199. https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0071	2023
			Systematic review		
			Apparent losses (AL)		
			Non-revenue water (NRW)		
2	Micro-electromechanical systems-based technologies for leak detection and localization in water supply networks: A bibliometric and systematic review	Eficiencia Hídrica	Leak detection	Tariq, S., Hu, Z., & Zayed, T. (2021). Micro-electromechanical systems-based technologies for leak detection and localization in water supply networks: A bibliometric and systematic review. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 289, 125751. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125751	2020
			Leak location		
			MEMS WSNS		
			Accelerometers		
			Hydrophones		
			Systematic review		
			Science mapping		
			Research opportunities		
			Real-time monitoring		
3	Review of research on performance indicators for water utilities	Gestión Ambiental	Aging	Sakai, H. (2024). Review of research on performance indicators for water utilities. <i>AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society</i> , 73(2), 167–182. https://doi.org/10.2166/aqua.2024.224	2024
			Asset management		
			Carbon neutral		
			Depopulation		
			Distribution pipe		
			Leakage management		
4	Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems	Eficiencia Hídrica	Permanent online monitoring	Rousso, B. Z., Lambert, M., & Gong, J. (2023). Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 410, 137193. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193	2023
			Urban water infrastructure		
			Water resources management		
			Internet of things		

No	Nombre del artículo	Enfoque principal	Palabras claves	Referencia Bibliográfica	Año
5	The future of piped water	Sostenibilidad	Piped	Milman, A., Kumpel, E., & Lane, K. (2021). The future of piped water. <i>Water International</i> , 46(7-8), 1000-1016. https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1995169	2021
			Water access safe		
			Water sustainability		
6	Water governance models for meeting sustainable development Goals: A structured literature review	Sostenibilidad	Water governance model	Di Vaio, A., Trujillo, L., D'Amore, G., & Palladino, R. (2021). Water governance models for meeting sustainable development goals: A structured literature review. <i>Utilities Policy</i> , 72, 101255. https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255	2021
			Water sustainability governance models		
			Sustainable development goals (SDG)		
			COVID-19 pandemic		
			Resilience theory		
7	Models and explanatory variables in modelling failure for drinking water pipes to support asset management: a mixed literature review	Eficiencia Hídrica	Water distribution	Forero-Ortiz, E., Martinez-Gomariz, E., Sanchez-Juny, M., Cardus Gonzalez, J., Cucchiatti, F., Baque Viader, F., & Sarrias Monton, M. (2023). Models and explanatory variables in modelling failure for drinking water pipes to support asset management: A mixed literature review. <i>Applied Water Science</i> , 13(11), 210. https://doi.org/10.1007/s13201-023-02013-1	2023
			Water network		
			Water pipeline failure		
			Infrastructure asset management		
			Pipe burst rate prediction		
			Pipe renewal		
8	Data-driven approaches and model-based methods for detecting and locating leaks in water distribution systems: a literature review	Eficiencia Hídrica	Leak detection	Nimri, W., Wang, Y., Zhang, Z., Deng, C., & Sellstrom, K. (2023). Data-driven approaches and model-based methods for detecting and locating leaks in water distribution systems: A literature review. <i>Neural Computing and Applications</i> , 35 (16), 11611-11623. https://doi.org/10.1007/s00521-023-08497-x	2023
			Water distribution systems		
			Data-driven approaches		
			Deep learning		
			Performance measures		
			Model-based methods		
9	Uncertainties in different leak localization methods for water distribution networks: a review	Eficiencia Hídrica	Uncertainty characterization	Mohan Doss, P., Rokstad, M. M., Steffelbauer, D., & Tscheikner-Gratl, F. (2023). Uncertainties in different leak localization methods for water distribution networks: A review. <i>Urban Water Journal</i> , 20(8), 953-967. https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2229301	2023
			Model-based methods		
			Data- driven methods		
			Hybrid methods		
			Leakage		

No	Nombre del artículo	Enfoque principal	Palabras claves	Referencia Bibliográfica	Año
10	State-of-the-art review of leak diagnostic experiments: Toward a smart water network	Eficiencia Hídrica	No dispone	Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2023). State-of-the-art review of leak diagnostic experiments: Toward a smart water network. WIREs Water, 10(5), e1667. https://doi.org/10.1002/wat2.1667	2023
11	Water Use Efficiency: A Review of Contextual and Behavioral Factors	Eficiencia Hídrica	Water use efficiency Human behavior Contextual factors Psychological factors Behavioral factors	Callejas Moncaleano, D. C., Pande, S., & Rietveld, L. (2021). Water use efficiency: A review of contextual and behavioral factors. Frontiers in Water, 3, 685650. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.685650	2021
12	Criteria-based critical review of artificial intelligence applications in water-leak management	Eficiencia Hídrica	Artificial intelligence Water-leak management Criteria-based review	Abdelmageed, S., Tariq, S., Boadu, V., & Zayed, T. (2022). Criteria-based critical review of artificial intelligence applications in water-leak management. Environmental Reviews, 30(2), 280–297. https://doi.org/10.1139/er-2021-0046	2022
13	Development of Methods for Diagnosing the Operating Conditions of Water Supply Networks over the Last Two Decades	Eficiencia Hídrica	Burst Detection methods Failures Leakage Water distribution system	Stańczyk, J., & Burszta-Adamiak, E. (2022). Development of methods for diagnosing the operating conditions of water supply networks over the last two decades. Water, 14(5), 786. https://doi.org/10.3390/w14050786	2022
14	Review of Water Leak Detection and Localization Methods through Hydrophone Technology	Eficiencia Hídrica	Hydrophones Water leaks Detection Localization Water distribution network (WDN).	Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2021). Review of water leak detection and localization methods through hydrophone technology. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 12(4), 03121002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000574	2021
15	Water Leak Detection: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions	Eficiencia Hídrica	Bibliometric analysis Leak detection Real-time monitoring Smart management Water distribution systems	Farah, E., & Shahrour, I. (2024). Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. Water, 16(20), 2975. https://doi.org/10.3390/w16202975	2024

No	Nombre del artículo	Enfoque principal	Palabras claves	Referencia Bibliográfica	Año
16	A Systematic Literature Review on Flow Data-Based Techniques for Automated Leak Management in Water Distribution Systems	Eficiencia Hídrica	Water leak management	Rajan, G., & Li, S. (2025). A systematic literature review on flow data-based techniques for automated leak management in water distribution systems. Smart Cities, 8(3), 78. https://doi.org/10.3390/smartcities8030078	2025
			Smart water management		
			Data-driven approach		
			Internet of Things		
			Flow sensor		
			Smart meter		
17	Cost-Benefit analysis of rehabilitation approaches for water distribution networks	Sostenibilidad	Sustainable development	Farouk, A. M., Romali, N. S., & Rahman, R. A. (2023). Cost-benefit analysis of rehabilitation approaches for water distribution networks. AIP Conference Proceedings, 2688, 040004. https://doi.org/10.1063/5.0111490	2023
			Water sustainability		
			Non-revenue water		
			Water distribution network		
			Cost-benefit analysis		
18	Advancing Smart Water Loss and Oil Spillage Management: A Comprehensive Review of Remote Sensing and GIS Application	Eficiencia Hídrica	Remote sensing	Ramovha, N., Mokoatle, M. C., Rathebe, P., & Sithole, T. (2026). Advancing smart water loss and oil spillage management: A comprehensive review of remote sensing and GIS application. Water Resources Management, 40(5), 191. https://doi.org/10.1007/s11269-026-04508-3	2026
			Geographic information systems (GIS)		
			Water loss management		
			Oil spillage detection and multi-sensor data fusion		

La evaluación metodológica mediante AMSTAR-2 adaptado evidenció que la mayoría de los artículos presentan una calidad media a alta en la definición de objetivos, la exhaustividad de la búsqueda y la aplicación de métodos de síntesis. No obstante, se identificaron tres categorías de debilidades recurrentes que afectan directamente la comparabilidad entre revisiones. En primer lugar, cabe señalar la ausencia o deficiencia en la declaración de conflictos de interés: nueve de los dieciocho artículos no reportaron la fuente de financiación ni declararon posibles conflictos entre los autores. Como advierten Shea et al. (2017), esta omisión impide evaluar si la selección de estudios o la interpretación

de resultados pudo estar influida por intereses externos, particularmente relevante en un campo donde parte de la literatura es producida o financiada por empresas tecnológicas proveedoras de soluciones de monitoreo inteligente.

Adicionalmente, se detectó la ausencia de evaluación explícita del riesgo de sesgo de los estudios primarios: once de los dieciocho artículos no reportaron haber evaluado el sesgo de selección, de publicación o de informe selectivo en los estudios incluidos. Esto genera estimaciones optimistas sobre la efectividad de las intervenciones, dado que las revisiones tienden a incorporar resultados positivos. En el ámbito técnico del ANC, las tasas de detección reportadas en laboratorio pueden ser significativamente superiores a las obtenidas en entornos reales, como advierten Bakhtawar & Zayed (2023) y Nimri et al. (2023). Finalmente, la tercera debilidad es la ausencia de análisis de heterogeneidad. Las condiciones de evaluación varían considerablemente entre estudios (material de tuberías, presión operativa, nivel de digitalización, contexto normativo y comportamiento del usuario difieren de forma sustancial) entre Europa, Asia y América Latina, lo que impide determinar si estrategias efectivas en un contexto son transferibles a otro. Por tanto, las conclusiones de las revisiones analizadas deben interpretarse con cautela respecto a su aplicabilidad universal.

En conjunto, estas tres debilidades no constituyen defectos aislados, sino condicionantes que comprometen de manera directa la comparabilidad entre las revisiones sintetizadas. La ausencia de declaración de financiación impide descartar el sesgo de patrocinio y, por tanto, ponderar en pie de igualdad revisiones potencialmente influidas por proveedores de tecnología de monitoreo frente a estudios de procedencia independiente. La omisión de una evaluación formal del riesgo de sesgo

en los estudios primarios introduce un sesgo de resultado positivo que infla de forma heterogénea las tasas de efectividad reportadas, de modo que las cifras de detección o de reducción de pérdidas no resultan directamente contrastables entre revisiones. Y la variabilidad no controlada de las condiciones de evaluación —material y antigüedad de la red, presión operativa, grado de digitalización, marco normativo y comportamiento del usuario— invalida cualquier agregación cuantitativa directa de los estimadores. Por consiguiente, la síntesis aquí desarrollada adopta deliberadamente una lógica narrativo-interpretativa y no aditiva: los hallazgos se integran mediante la identificación de patrones convergentes y divergentes, y no a través de la combinación de estimadores que la heterogeneidad estructural del corpus no autoriza. Reconocer explícitamente esta limitación no debilita la revisión, sino que delimita con rigor el alcance inferencial de sus conclusiones.

En cuanto al contenido, los estudios muestran una fuerte orientación técnica, destacándose temas como la detección de fugas, la modelación hidráulica, el uso de sensores acústicos y de presión de alta frecuencia, y la aplicación de metodologías basadas en datos (inteligencia artificial, machine learning, deep learning). Estas aproximaciones se concentran principalmente en la reducción de pérdidas reales, lo que evidencia una tendencia global hacia la automatización, la digitalización de redes y la transición hacia sistemas de monitoreo en tiempo real.

Sin embargo, la sistematización también revela un vacío importante en el abordaje de las dimensiones institucionales, sociales y de gobernanza. Pocos estudios analizan el comportamiento del usuario, las barreras organizacionales, los marcos normativos o la sostenibilidad financiera, a pesar de que estas dimensiones son determinantes para la efectividad de las intervenciones.

Los hallazgos obtenidos responden de forma diferenciada a cada dimensión de la pregunta, permitiendo formular recomendaciones específicas y explícitas sobre la orientación de soluciones a las problemáticas planteadas.

El análisis se organiza en función de la pregunta que orientó la revisión —qué estrategias, identificadas en revisiones sistemáticas y metaanálisis, permiten reducir los impactos técnicos, económicos, sociales, políticos y ambientales del ANC—, de manera que cada dimensión de la respuesta se examina en correspondencia directa con el objetivo específico que la sustenta. Para cada eje se establece, en primer término, en qué medida la evidencia sintetizada satisface el objetivo planteado; en segundo término, qué vacíos persisten pese a dicha evidencia; y, por último, qué soluciones se derivan con respaldo empírico de los hallazgos. Con esta estructura, la discusión no se limita a describir resultados, sino que evalúa críticamente el grado de cumplimiento de los objetivos del estudio y explicita la trazabilidad entre pregunta de investigación, hallazgo y recomendación.

En su *dimensión técnica*, el objetivo de identificar estrategias de reducción de pérdidas reales se cumple ampliamente: doce de los dieciocho artículos revisados abordan tecnologías de detección y localización de fugas mediante sensores acústicos y de presión de alta frecuencia, inteligencia artificial, enfoques basados en datos (data-driven) y modelación hidráulica (Farah & Shahrour, 2024; Nimri et al., 2023; Rajan & Li, 2025; Bakhtawar & Zayed, 2023). La convergencia de estos estudios confirma una transición global desde el monitoreo en tiempo no real hacia sistemas de monitoreo continuo e inteligente, lo que constituye la respuesta técnica más consolidada a la problemática planteada. No obstante, la consolidación de esta respuesta técnica contrasta con su débil

validación en condiciones operativas reales; de ahí que cualquier recomendación derivada deba condicionarse a su verificación empírica situada antes de escalarse como política sectorial, en particular en contextos de baja capacidad institucional donde la transferencia acrítica de soluciones puede reproducir ineficiencias en lugar de corregirlas.

Con base en estos hallazgos, se formulan las siguientes recomendaciones explícitas para la dimensión técnica:

a) Implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real. Los estudios de Rouso et al. (2023), Tariq et al. (2021) y Bakhtawar & Zayed (2023) coinciden en que sensores de presión y acústicos de alta frecuencia permiten la detección temprana de fugas. Para contextos de implementación inicial, se recomienda comenzar con la delimitación de zonas manejables (DMA/ZMD) de menor complejidad antes de la instalación de una red de sensores de cobertura integral

b) Modelación hidráulica calibrada como requisito previo. Forero-Ortiz et al. (2023) y Rajan & Li (2025) enfatizan que es fundamental contar con un modelo hidráulico del sistema calibrado y validado antes de implementar cualquier intervención de sectorialización o instalación de válvulas de control, pues permite simular respuestas sin riesgos operativos de intermitencia o problemas de presión

c) Técnicas de rehabilitación costo-eficientes para contextos con capacidades limitadas. Farouk et al. (2023a) identificó mediante análisis costo-beneficio que las técnicas sin zanja (trenchless technology), SCADA, zonificación de redes y revestimiento deslizante son las más recomendadas por su relación beneficio-costos, siendo especialmente aplicables en países en desarrollo como contextos latinoamericanos donde existen limitaciones presupuestarias.

Respecto a la *dimensión económica*, el estudio tenía como objetivo identificar estrategias que mejoren la sostenibilidad financiera de las empresas prestadoras. Los hallazgos de Farouk et al. (2023a), que analiza comparativamente enfoques de rehabilitación costo-beneficio en Egipto y Malasia, y los de Milman et al. (2021) sobre el futuro del agua potable, evidencian que las decisiones de inversión en infraestructura deben articularse con la viabilidad financiera a largo plazo. Las técnicas sin zanja emergen como las más rentables en contextos de países en desarrollo.

Sin embargo, la literatura revisada presenta un vacío crítico: la escasez de estudios que modelen escenarios de retorno de inversión adaptados a utilidades con capacidad limitada, característica predominante en América Latina. En este contexto, se recomienda:

a) Análisis costo-beneficio adaptado a capacidades operativas reales. Se recomienda que antes de cualquier inversión tecnológica, se realicen análisis costo-beneficio que consideren explícitamente las limitaciones de capital humano, financiero y operativo de empresas públicas latinoamericanas, evitando la transferencia acrítica de modelos diseñados para contextos europeos o asiáticos.

b) Integración de decisiones de inversión con gestión de activos y sostenibilidad financiera. Milman et al. (2021) subraya que el futuro del agua potable será resultado de esfuerzos combinados en infraestructura, gestión y finanzas. Se sugiere implementar esquemas de planificación financiera multianual que alineen inversiones en detección de fugas con planes de renovación de tuberías, mejora de sistemas de facturación y recaudación.

En la *dimensión social y de gobernanza*, el objetivo de identificar estrategias que aborden los impactos sobre usuarios y comunidades

queda parcialmente respondido. Callejas Moncaleano et al. (2021) y Di Vaio et al. (2021) son los únicos estudios que abordan de forma explícita los factores conductuales, contextuales e institucionales. Sus hallazgos señalan que el éxito de las intervenciones técnicas depende en gran medida de la percepción ciudadana, la confianza institucional y la cultura de uso del agua. Esta evidencia sugiere que las estrategias puramente tecnológicas tienen un alcance limitado si no se acompañan de marcos regulatorios robustos y procesos participativos. Ante esta brecha crítica, se propone:

a) Indicadores multinivel de desempeño vinculados a ODS. Sakai (2024) advierte sobre la brecha significativa entre estudios teóricos y matemáticos robustos sobre tuberías y gestión de fugas versus su aplicación en políticas y decisiones empresariales reales. Se recomienda adoptar indicadores de desempeño que integren explícitamente contexto social y ambiental a largo plazo, alineados con ODS 6.1 (acceso equitativo al agua), ODS 6.4 (eficiencia en el uso de recursos hídricos) y ODS 6.b (participación comunitaria en la gestión del agua)

b) Programas de educación y cambio de comportamiento. Callejas Moncaleano et al. (2021) halló que el comportamiento humano es determinante para el uso eficiente del agua, siendo que el éxito de medidas de uso eficiente se ha visto limitado por la falta de evaluación integrada de factores conductuales y contextuales. Se sugieren programas de educación que aborden explícitamente la cultura del subsidio en contextos latinoamericanos, desincentiven el consumo no autorizado y promuevan la corresponsabilidad en el cuidado del recurso, particularmente en zonas urbanas y periurbanas

c) Coproducción comunitaria de soluciones y mecanismos de rendición de cuentas. Más allá de la detección técnica de pérdidas, se requiere la participación ciudadana desde las fases iniciales de diagnóstico y definición de estrategias. Los estudios sobre gobernanza del agua (Di Vaio et al., 2021) demuestran que la legitimidad institucional y la confianza ciudadana son clave para que las medidas sean sostenibles a largo plazo y generen apropiación social de las soluciones.

Finalmente, desde la *dimensión ambiental*, la reducción del ANC aparece vinculada directamente a la disminución de la huella de carbono de los sistemas de distribución y a la conservación de acuíferos y fuentes superficiales. Farah & Shahrour (2024) documentan que la gestión proactiva de fugas reduce la extracción innecesaria de agua y el consumo energético asociado al tratamiento y distribución, mitigando indirectamente las emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, se confirma la ausencia de indicadores ambientales estandarizados aplicables a los sistemas de distribución de agua potable, lo que constituye un vacío metodológico prioritario. Para esta dimensión se recomienda:

a) Adopción de indicadores de huella hídrica y huella de carbono estandarizados. Farah & Shahrour (2024) subrayan que la reducción del ANC no solo mejora la eficiencia operativa, sino que minimiza la extracción innecesaria de agua, agotamiento de acuíferos y reduce significativamente el consumo energético. Se recomienda la adopción de metodologías de cálculo estandarizadas (como ISO 14046 para huella hídrica) que permitan comparabilidad entre regiones y faciliten el reporte de progreso hacia ODS

b) Análisis de incertidumbre en métodos de localización de fugas para contextos con datos incompletos. Mohan Doss et al.

(2023) y Nimri et al. (2023) identificaron que los enfoques basados en datos gestionan mejor la incertidumbre que los métodos puramente basados en modelos matemáticos. Esta es una recomendación crítica para contextos latinoamericanos donde los catastros hidráulicos son incompletos y los registros de consumo presentan errores sistemáticos.

4. Conclusiones

Esta revisión de revisiones sintetizó la evidencia disponible en 18 artículos de revisión sistemática, bibliométrica y de alcance publicados entre 2020 y 2026, con el objetivo de identificar las estrategias de reducción del ANC y sus implicaciones técnicas, económicas, sociales, políticas y ambientales. Los artículos analizados coinciden en que las pérdidas de agua no constituyen únicamente un problema técnico-operativo, sino un fenómeno multidimensional que afecta la sostenibilidad económica, ambiental e institucional de las empresas prestadoras. Esta perspectiva es especialmente relevante en sistemas urbanos, donde el envejecimiento de la infraestructura, la presión financiera, la variabilidad climática y la limitada capacidad institucional incrementan la vulnerabilidad de los servicios. A partir de estos resultados, es posible formular las siguientes conclusiones analíticas.

La evidencia sintetizada confirma que la investigación sobre ANC está mayoritariamente orientada hacia la detección y localización de pérdidas reales mediante tecnologías de sensorización avanzada, análisis de datos y modelación hidráulica. Este patrón indica un desplazamiento progresivo desde técnicas manuales e intermitentes hacia sistemas de monitoreo continuo basados en IoT e inteligencia artificial. Si bien este desarrollo es tecnológicamente robusto, la literatura advierte sobre la

brecha entre los rendimientos obtenidos en condiciones experimentales y los alcanzados en entornos operativos reales (Bakhtawar & Zayed, 2023; Nimri et al., 2023), lo que subraya la necesidad de validación empírica en contextos diversos antes de generalizar recomendaciones de política.

Los estudios más recientes (Sakai, 2024; Milman et al., 2021; Di Vaio et al., 2021) convergen en señalar que la reducción sostenible del ANC no puede alcanzarse mediante intervenciones tecnológicas aisladas. La efectividad de las estrategias depende de la articulación de tres pilares interdependientes: innovación técnica, gestión financiera robusta y marcos regulatorios e institucionales adecuados. Esta convergencia constituye un aporte conceptual relevante de la presente revisión, en tanto sistematiza y fundamenta, a partir de la evidencia acumulada, la insuficiencia de los enfoques sectoriales que históricamente han predominado en la práctica de las empresas prestadoras.

La concentración de los estudios en contextos europeos, norteamericanos y asiáticos implica que las estrategias documentadas han sido evaluadas bajo condiciones de infraestructura, financiamiento y gobernanza sustancialmente distintas a las que prevalecen en América Latina. En la región, los sistemas de distribución se caracterizan por el envejecimiento de la infraestructura, el servicio intermitente, los catastros de redes incompletos, la prevalencia del subsidio al consumo y las débiles capacidades técnicas y financieras de las empresas operadoras (Van den Berg & Danilenko, 2017; Guevara Pérez De La Torre, 2019). Estas diferencias contextuales limitan la transferibilidad directa de los hallazgos y subrayan la urgente necesidad de investigación empírica situada en realidades latinoamericanas.

La revisión identifica tres vacíos sistemáticos en la literatura:

i. La escasez de estudios que analicen los factores conductuales, sociales y de percepción ciudadana como determinantes del ANC, a pesar de que la evidencia disponible señala su relevancia decisiva para la sostenibilidad de las intervenciones (Callejas Moncaleano et al., 2021).

ii. La ausencia de indicadores ambientales estandarizados que permitan cuantificar el impacto ecológico del ANC y evaluar comparativamente el desempeño ambiental de las estrategias de reducción.

iii. La falta de estudios de análisis costo-beneficio adaptados a empresas con capacidades operativas y financieras limitadas, que son precisamente las que mayores tasas de ANC registran.

Estas brechas configuran una agenda de investigación prioritaria para los próximos años, que deberá avanzar hacia enfoques interdisciplinarios capaces de integrar innovación tecnológica, gobernanza del agua, comportamiento del usuario y sostenibilidad financiera, con el fin de desarrollar soluciones adaptadas a realidades locales.

La adopción del diseño de revisión de revisiones con evaluación adaptada de AMSTAR-2 permitió, por primera vez en este campo temático, integrar de forma sistemática los hallazgos de múltiples revisiones sobre ANC y evaluar críticamente su calidad metodológica. Esta aproximación revela que, si bien el volumen de literatura de síntesis sobre ANC ha crecido significativamente entre 2020 y 2026, persisten debilidades metodológicas estructurales que comprometen la solidez de las conclusiones individuales y exigen cautela en su aplicación directa a la toma de decisiones de política.

En términos de aporte, la contribución de esta revisión no reside en la acumulación de estrategias, sino en evidenciar de forma sistemática, y

con respaldo en la evaluación de calidad metodológica, que el campo ha privilegiado la sofisticación tecnológica de la detección de pérdidas reales en detrimento de las condiciones institucionales, financieras y sociales que determinan su sostenibilidad. Esta asimetría, hasta ahora enunciada de manera fragmentaria en estudios aislados, queda aquí documentada como un patrón estructural del corpus de evidencia secundaria. La consecuencia analítica es inequívoca: la transferencia de estrategias validadas en contextos de alta capacidad institucional hacia realidades de baja capacidad —como las latinoamericanas— carece de fundamento empírico y constituye, en sí misma, un riesgo de política pública que la investigación futura debe abordar de manera prioritaria mediante estudios situados y metodológicamente robustos.

En síntesis, el ANC constituye un problema de gestión hídrica de alta complejidad cuya solución requiere una estrategia integrada que articule la innovación tecnológica con la transformación institucional, la participación ciudadana y la sostenibilidad financiera de las empresas prestadoras. Esta revisión aporta una base de evidencias sistemática para orientar dicha estrategia y señala con precisión los límites de la evidencia disponible y las condiciones necesarias para su aplicación contextualizada. La reducción del ANC, lejos de ser un desafío puramente técnico, es ante todo un problema de gobernanza del agua que demanda respuestas interdisciplinarias, adaptadas a los contextos locales y fundamentadas en evidencia de calidad metodológica verificable.

5. Declaración de financiamiento

Los autores no recibieron apoyo financiero para la investigación, autoría y publicación de este artículo.



6. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de carácter financiero, profesional, institucional o personal que pudieran haber influido en el diseño, desarrollo, análisis, interpretación de los resultados o elaboración del presente manuscrito.

7. Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante la preparación del manuscrito se utilizó ChatGPT como herramientas de inteligencia artificial generativa para la validación de la cadena de búsqueda y como apoyo editorial para depurar la gramática, la sintaxis y la claridad de la redacción, así como para cotejar la correspondencia y consistencia entre las citas incluidas en el texto y la lista de referencias. La inteligencia artificial no fue utilizada para generar datos, resultados, interpretaciones, conclusiones ni contenido científico original. Todas las sugerencias fueron revisadas y verificadas críticamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido, exactitud, integridad y versión final del manuscrito.

8. Referencias

Abdelmageed, S., Tariq, S., Boadu, V., & Zayed, T. (2022). Criteria-based critical review of artificial intelligence applications in water-leak management. *Environmental Reviews*, 30(2), 280–297. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0046>

- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera, E., Jr., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2016). *Performance indicators for water supply services* (3rd ed.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780406336>
- Al-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., AL-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. (2020). Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104515. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104515>
- Apolo, D., García, P., Sáenz, A. B., Quiroz, M., & Córdova, M. S. (2018). Ecuador: Investigación sobre representaciones sociales e imaginarios sociales en universidades de posgrado de Ecuador. Una revisión sistemática. En: F. A. Aliaga Sáez, M. L. Maric Palenque, & C. J. Uribe Mendoza (eds.). *Imaginarios y representaciones sociales: Estado de la investigación en Iberoamérica* (pp. 265–292). Ediciones USTA. <https://doi.org/10.2307/j.ctvckq982.9>
- Aromataris, E., & Munn, Z. (eds.). (2020). *JBI manual for evidence synthesis*. JBI. <https://synthesismanual.jbi.global>
- Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2021). Review of water leak detection and localization methods through hydrophone technology. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(4), 03121002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000574](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000574)
- Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2023). State-of-the-art review of leak diagnostic experiments: Toward a smart water network. *WIREs Water*, 10(5), e1667. <https://doi.org/10.1002/wat2.1667>

- Benito, B., Faura, Ú., Guillamón, M.-D., & Ríos, A.-M. (2019). Empirical evidence for efficiency in provision of drinking water. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(4), 06019002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001049)
- Bonczar, M., Ostrowski, P., D'Antoni, A. V., Tubbs, R. S., Iwanaga, J., Ghosh, S. K., Klejbor, I., Kuniewicz, M., Walocha, J., Moryś, J., & Koziej, M. (2023). How to write an umbrella review? A step-by-step tutorial with tips and tricks. *Folia Morphologica*, 82(1), 1–6. <https://doi.org/10.5603/FM.a2022.0104>
- Callejas Moncaleano, D. C., Pande, S., & Rietveld, L. (2021). Water use efficiency: A review of contextual and behavioral factors. *Frontiers in Water*, 3, 685650. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.685650>
- Di Vaio, A., Trujillo, L., D'Amore, G., & Palladino, R. (2021). Water governance models for meeting sustainable development goals: A structured literature review. *Utilities Policy*, 72, 101255. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255>
- Farah, E., & Shahrour, I. (2024). Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. *Water*, 16(20), 2975. <https://doi.org/10.3390/w16202975>
- Farouk, A. M., Rahman, R. A., & Romali, N. S. (2023a). Economic analysis of rehabilitation approaches for water distribution networks: Comparative study between Egypt and Malaysia. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(1), 130–149. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2021-0174>

- Farouk, A. M., Rahman, R. A., & Romali, N. S. (2023b). Non-revenue water reduction strategies: A systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 181–199. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0071>
- Farouk, A. M., Romali, N. S., & Rahman, R. A. (2023). Cost-benefit analysis of rehabilitation approaches for water distribution networks. *AIP Conference Proceedings*, 2688, 040004. <https://doi.org/10.1063/5.0111490>
- Forero-Ortiz, E., Martinez-Gomariz, E., Sanchez-Juny, M., Cardus Gonzalez, J., Cucchietti, F., Baque Viader, F., & Sarrias Monton, M. (2023). Models and explanatory variables in modelling failure for drinking water pipes to support asset management: A mixed literature review. *Applied Water Science*, 13(11), 210. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02013-1>
- Frauendorfer, R., & Liemberger, R. (2010). *The issues and challenges of reducing non-revenue water*. Asian Development Bank. <http://hdl.handle.net/11540/1003>
- Guevara Pérez, E., & De La Torre, A. A. (2019). *Gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca y cultura del agua*. Autoridad Nacional del Agua. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4302>
- Hernández-González, O., Rondón Mejías, B. I., & González-Fernández, D. F. (2023). Revisión de revisiones: Un nuevo método para abordar la literatura empírica. *Bibliotecas. Anales de Investigación*, 19(1), 1–11. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8879557>

- Hoekstra, A., Chapagain, A., & Van Oel, P. (2017). Advancing water footprint assessment research: Challenges in monitoring progress towards Sustainable Development Goal 6. *Water*, 9(6), 438. <https://doi.org/10.3390/w9060438>
- International Water Association. (2013). *IWA best practice standard water balance*. <https://www.leakssuitelibrary.com/iwa-water-balance>
- Kanakoudis, V., & Gonelas, K. (2016). Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: From theory to practice. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11436–11446. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1049967>
- Khair, S. M., Mushtaq, S., Reardon-Smith, K., & Ostini, J. (2019). Diverse drivers of unsustainable groundwater extraction behaviour operate in an unregulated water scarce region. *Journal of Environmental Management*, 236, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.077>
- Kollmuss, A., & Agyeman, J. (2002). Mind the gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior?. *Environmental Education Research*, 8(3), 239–260. <https://doi.org/10.1080/13504620220145401>
- Manouseli, D., Kayaga, S. M., & Kalawsky, R. (2019). Evaluating the effectiveness of residential water efficiency initiatives in England: Influencing factors and policy implications. *Water Resources Management*, 33(7), 2219–2238. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2176-1>

- Markey-Towler, B. (2019). Rules, perception and emotion: When do institutions determine behaviour?. *Journal of Institutional Economics*, 15(3), 381–396. <https://doi.org/10.1017/S1744137418000267>
- Martín-Martín, A., Thelwall, M., Orduna-Malea, E., & Delgado López-Cózar, E. (2021). Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI: A multidisciplinary comparison of coverage via citations. *Scientometrics*, 126(1), 871–906. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03690-4>
- Milman, A., Kumpel, E., & Lane, K. (2021). The future of piped water. *Water International*, 46(7–8), 1000–1016. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1995169>
- Mohan Doss, P., Rokstad, M. M., Steffelbauer, D., & Tscheikner-Gratl, F. (2023). Uncertainties in different leak localization methods for water distribution networks: A review. *Urban Water Journal*, 20(8), 953–967. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2229301>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (A/RES/70/1). <https://undocs.org/es/A/RES/70/1>
- Nimri, W., Wang, Y., Zhang, Z., Deng, C., & Sellstrom, K. (2023). Data-driven approaches and model-based methods for detecting and locating leaks in water distribution systems: A literature review. *Neural Computing and Applications*, 35(16), 11611–11623. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08497-x>
- OpenAI. (2025). *ChatGPT* [Large language model]. <https://chatgpt.com/>

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Pollock, D., Peters, M. D. J., Khalil, H., McInerney, P., Alexander, L., Tricco, A. C., Evans, C., De Moraes, É. B., Godfrey, C. M., Pieper, D., Saran, A., Stern, C., & Munn, Z. (2023). Recommendations for the extraction, analysis, and presentation of results in scoping reviews. *JBIC Evidence Synthesis*, 21(3), 520–532. <https://doi.org/10.11124/JBIES-22-00123>
- Rajan, G., & Li, S. (2025). A systematic literature review on flow data-based techniques for automated leak management in water distribution systems. *Smart Cities*, 8(3), 78. <https://doi.org/10.3390/smartcities8030078>
- Ramovha, N., Mokoatle, M. C., Rathebe, P., & Sithole, T. (2026). Advancing smart water loss and oil spillage management: A comprehensive review of remote sensing and GIS application. *Water Resources Management*, 40(5), 191. <https://doi.org/10.1007/s11269-026-04508-3>

- Roussio, B. Z., Lambert, M., & Gong, J. (2023). Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193>
- Sakai, H. (2024). Review of research on performance indicators for water utilities. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(2), 167–182. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.224>
- Shea, B. J., Reeves, B. C., Wells, G., Thuku, M., Hamel, C., Moran, J., Moher, D., Tugwell, P., Welch, V., Kristjansson, E., & Henry, D. A. (2017). AMSTAR 2: A critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ*, 358, j4008. <https://doi.org/10.1136/bmj.j4008>
- Stańczyk, J., & Burszta-Adamiak, E. (2022). Development of methods for diagnosing the operating conditions of water supply networks over the last two decades. *Water*, 14(5), 786. <https://doi.org/10.3390/w14050786>
- Tariq, S., Hu, Z., & Zayed, T. (2021). Micro-electromechanical systems-based technologies for leak detection and localization in water supply networks: A bibliometric and systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125751>
- Van den Berg, C., & Danilenko, A. (2017). *Performance of water utilities in Africa*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/26186>

- Wu, W., Maier, H. R., Dandy, G. C., Arora, M., & Castelletti, A. (2020). The changing nature of the water–energy nexus in urban water supply systems: A critical review of changes and responses. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1095–1122. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.276>
- Yi, S. M., Bhaktikul, K., Manomaipiboon, K., & Kongjun, T. (2017). Assessment of non-revenue water situation in Mandalay City: Response to the management of sustainable water supply system in Mandalay City. *Environment and Natural Resources Journal*, 15(2), 71–80. <https://doi.org/10.14456/ENNRJ.2017.14>
- Ziegler, D., Sorg, F., Fallis, P., Hübschen, K., Happich, L., Baader, J., Trujillo, R., Mutz, D., Oertlé, E., Klingel, P., & Knobloch, A. (2011). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua: Un enfoque en la gestión de la presión*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). <https://bdd.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=2587&l=es>