

## Transformación Digital de la Gestión del Agua: Avances en Ciudades de Países en Desarrollo



Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.44  
Julio - diciembre 2025  
Reia4412 pp. 1-41

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

### PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Hernández Avilés, D. M.; Osorio Tabares, Y. A. y Osorio Rodríguez, H. A.  
Transformación Digital de la Gestión del Agua: Avances en Ciudades de Países en Desarrollo

Revista EIA, 22(44), Reia4412 pp. 1-41  
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1855>

✉ *Autor de correspondencia:*  
Hernández Avilés, D. M.  
Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente y Maestría Ingeniería Civil con énfasis en Saneamiento Ambiental  
Correo electrónico:  
[diana.hernandez@unimilitar.edu.co](mailto:diana.hernandez@unimilitar.edu.co)

**Recibido:** 27-01-2025  
**Aceptado:** 10-06-2025  
**Disponibile online:** 01-07-2025

✉ DIANA MARGARITA HERNÁNDEZ AVILÉS<sup>1</sup>  
YESICA ALEJANDRA OSORIO TABARES<sup>1</sup>  
HAROL ANDRES OSORIO RODRIGUEZ<sup>1</sup>

1. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

### Resumen

Este estudio analiza el efecto que tienen las iniciativas de agua digital sobre la gestión hídrica y la sostenibilidad urbana en ciudades de Latinoamérica y África. En un marco en el que coexisten problemáticas como el cambio climático y el incremento poblacional, estas tecnologías se presentan como herramientas clave para la optimización de los recursos hídricos. El objetivo principal es verificar como distintas soluciones digitales pueden transformar los sistemas de gestión hídrica y la sostenibilidad urbana, mediante sensores inteligentes, sistemas de monitorización, tecnologías para el control de la calidad de las aguas residuales, agua lluvia, distribución y gestión en situaciones de crisis. Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica sistematizada, que se ha integrado con un análisis de datos encontrados en estudios desarrollados en ciudades con distintos niveles de infraestructura tecnológica y acceso a los recursos hídricos. Los resultados indican que las tecnologías digitales tienen el potencial de disminuir de forma notable las pérdidas de agua, mejorar el funcionamiento operativo de los sistemas y aumentar la capacidad de respuesta ante la crisis. Las ciudades que tienen una infraestructura tecnológica más avanzada obtienen resultados mejores, pero al mismo tiempo se identifican barreras como la exigencia de inversión en investigación y desarrollo, estabilidad política y acceso a la financiación. Se concluye que la incorporación de las tecnologías digitales dentro de las políticas de gestión hídrica favorece la sostenibilidad y la resiliencia urbana ante los retos globales que tienen que afrontar el cambio climático o el crecimiento poblacional. Este estudio resalta y fomenta iniciativas digitales pensadas para ser replicables y flexibles en distintas regiones, reduciendo su impacto y maximizando su alcance.

**Palabras Claves:** Gestión hídrica sostenible, Ciudades inteligentes, Tecnologías digitales, Transformación digital del agua

---

# Digital Transformation of Water Management: Advances in Cities of Developing Countries

## Abstract

This study analyzes the impact of digital water initiatives on water management and urban sustainability in cities across Latin America and Africa. In a context where challenges such as climate change and population growth coexist, these technologies emerge as key tools for optimizing water resources. The main objective is to verify how various digital solutions can transform water management systems and urban sustainability through the use of smart sensors, monitoring systems, technologies for controlling wastewater quality, rainwater management, distribution, and crisis management. A systematic literature review was conducted and integrated with data analysis from studies developed in cities with varying levels of technological infrastructure and access to water resources. The results indicate that digital technologies have the potential to significantly reduce water losses, improve the operational performance of systems, and increase crisis response capacity. Cities with more advanced technological infrastructure achieve better outcomes; however, barriers such as the need for investment in research and development, political stability, and access to funding were also identified. The study concludes that incorporating digital technologies into water management policies promotes sustainability and urban resilience in the face of global challenges such as climate change and population growth. This study highlights and encourages digital initiatives designed to be replicable and flexible across different regions, minimizing their impact while maximizing their reach.

**Keywords:** Sustainable water management, Smart cities, Digital technologies, Digital water transformation

## 1. Introducción

Durante las últimas décadas, la gestión del agua se ha convertido en un desafío significativo a nivel global, en particular América Latina y África, donde las ciudades han crecido vertiginosamente al tiempo que el cambio climático ha comenzado a hacer efecto; lo cual ha incrementado considerablemente la presión sobre los recursos

hídricos (Bonilla et al., 2023; Bouramdane, & Ayat-Allah, 2023). Es importante resaltar, las tecnologías digitales para la gestión del agua o también llamada “agua digital” son presentadas como una respuesta novedosa para afrontar las problemáticas. Este tema es importante por su capacidad de cambiar el enfoque hacia la gestión del agua y la forma en que esta puede llegar a ser más eficiente, buscando minimizar las pérdidas dentro de las redes de distribución. A la vez, el tema tiene un sentido oportuno en virtud del crecimiento de la demanda de agua y la necesidad de poder optimizar el uso de la misma y asegurar la sostenibilidad a largo plazo (Mendoza-Gómez et al., 2022; Verma et al., 2019).

Investigaciones anteriores, han demostrado que las tecnologías digitales pueden llegar a ser muy eficaces para la gestión del agua. Un claro ejemplo de ello lo forman los trabajos de Bonilla et al. (2023) quienes han demostrado, cómo los sensores y plataformas de análisis de datos, permiten conseguir una monitorización en tiempo real, lo cual mejora significativamente la gestión del agua e incrementa la posibilidad de reducir las pérdidas. De hecho, los sistemas de sensores que aquí se describen permiten con su implementación la anticipación de problemas como pueden ser las pérdidas o averías de la infraestructura, de manera que se tenga una mejor respuesta. Además, según lo considerado por la literatura, Mezni et al. (2022) insisten en la importancia del marco SmartWater que integra tecnologías IoT (Internet de las Cosas) para el monitoreo y la gestión del agua a partir de la existencia de datos que pueden apoyarse en la toma de decisiones. En este sentido, la investigación de Hemdan et al. (2023) habla de un sistema automatizado para prever la calidad del agua basado en el aprendizaje automático, con el fin de verificar su calidad y facilitar una gestión proactiva. Además, Abdeljebbar *et al.* (2019) proponen cuatro pilares en la gestión del agua inteligente: humano, legal-político, económico y tecnológico, enfatizando que el éxito de estas iniciativas depende del contexto social y económico.

La utilización de tecnologías digitales para la recopilación y el análisis de datos se traduce en una gestión que tiende hacia una mayor proactividad y que permite un mejor aprovechamiento del agua, así como una mayor eficiencia operativa. Sin embargo, se identifican algunos consensos sobre la efectividad de estas

tecnologías, la cual presenta una variabilidad según el contexto en el que se desarrollen. Aunque se constata que son herramientas con un gran potencial por parte de muchos investigadores, existe cierta controversia sobre su efecto uniforme en distintas zonas. Las evidencias más recientes subrayan que las barreras sociales y económicas pueden restringir la adopción y al éxito de las tecnologías digitales, en ciertas áreas (Bouramdane & Ayat-Allah, 2023). Gonçalves et al. (2020) y Hemdan et al. (2023) convergen en apuntar que en algunas ciudades se han implementado soluciones digitales, pero observan que existen determinadas barreras de considerable importancia, como pueden ser la falta de la infraestructura adecuada o de materialización de ciertas regulaciones institucionales (Ascencao et al., 2023; Mazari-Hiriart et al., 2019).

A pesar de los progresos tecnológicos, sigue existiendo un vacío de conocimientos en cómo las barreras sociales y económicas influyen sobre la adopción de tecnologías digitales dependiendo del contexto en el que se desarrollen. Aunque existe una categoría de estudios que ofrecen documentación relativa a su efectividad o inutilidad, es necesario profundizar sobre cómo las realidades de los lugares donde estos dispositivos digitales se van introduciendo pueden ser importantes para su implementación y qué estrategias podrían resultar más eficaces para la superación de estas barreras (Furtado et al., 2021; Mendoza-Gómez et al., 2022). La relevancia de este estudio radica en sus posibilidades para la comprensión de las iniciativas de agua digital desarrollados en ciudades africanas y latinoamericanas, remarcando los tipos de tecnologías digitales utilizadas, así como algunos factores que las afectan. Además de la posibilidad de una visión exhaustiva del impacto que tienen estas tecnologías sobre la población y el papel que tienen dentro del contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y su contribución a los mismos, pone en relieve el papel determinante que tienen las instituciones tanto públicas como privadas en el desarrollo y la sostenibilidad de estas mismas soluciones. La identificación de patrones comunes y dificultades propias de la visibilización de los usos de las Tecnologías Digitales para la gestión del agua en el contexto urbano de estos territorios, siendo una buena manera para lograr aumentar la eficiencia del uso del agua y su sostenibilidad

en estas regiones (Madonsela et al., 2019; Perea et al., 2021). El objetivo de esta revisión es caracterizar y comparar las iniciativas de agua digital en las ciudades de América Latina y África. La extensión de esta revisión se refiere, a los estudios realizados en la última década y que abordan interacciones de tipo tecnológico, social y económico en relación a la gestión del agua digital, limitándose a abordar cómo es la adopción de estas tecnologías en el contexto urbano pertenecientes a ciudades de América Latina y África, excluyendo estudios que no aporten datos sobre su impacto en los contextos de interés. La revisión también tiene por objeto ofrecer una visión comprensiva de las aplicaciones y de los resultados de las tecnologías digitales, recomendando prácticas sobre cómo se puede mejorar la gestión del agua en distintos entornos.

El artículo de revisión está estructurado de la siguiente manera: La sección 2 es un resumen que ofrece una visión general de las iniciativas de agua digital, donde se expone cómo estas tecnologías se están constituyendo como soluciones innovadoras en relación a la gestión del agua en América Latina y África, mejorando la eficiencia y reduciendo las pérdidas en la distribución; la sección 3 se encarga de informar sobre la metodología que se utilizó para la revisión y de los indicadores que se tuvieron en cuenta para valorar la eficacia de las tecnologías digitales y de la clasificación de los estudios revisados; la sección 4 presenta un análisis exhaustivo de los resultados encontrados, donde se describen las iniciativas y estrategias de agua digital en América Latina y África, se clasifica la información citada e incluso se analizan los factores de implementación relacionados, como la inversión en investigación y desarrollo (I+D), la infraestructura tecnológica y la estabilidad política; por último, la sección 5 concluye con una recopilación de los hallazgos y recomendaciones para futuras investigaciones, subrayando la relevancia de integrar dimensiones sociales, técnicas y ambientales, así como la necesidad de fomentar la colaboración mutua entre instituciones públicas, privadas y educativas para maximizar el impacto de estas iniciativas en la sostenibilidad y en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

### *1.1. Tecnologías Digitales en la Gestión Sostenible del Agua*

La teoría de gestión sostenible del agua establece que la incorporación de tecnologías digitales, como el uso de sensores avanzados y de plataformas de análisis, puede mejorar considerablemente la efectividad en el uso de los recursos hídricos. Estas herramientas permiten una gestión más eficiente y conducen a la reducción de las pérdidas de agua (Lima et al., 2019). Este modelo sustenta que herramientas como sensores avanzados y plataformas de análisis, permiten una gestión más eficiente y reducen las pérdidas. A partir de este planteamiento, el concepto “agua digital” se refiere a la utilización de tecnologías avanzadas para facilitar el monitoreo y la gestión eficiente de los recursos hídricos. Un claro ejemplo de estas tecnologías es el sistema Smart Water, que utiliza la combinación de IoT, gráficos de conocimiento y aprendizaje profundo, y permite llevar a cabo un monitoreo y gestión en tiempo real de la calidad y cantidad de agua para facilitar la toma de decisiones en función de las condiciones actuales en las zonas afectadas (Mezni et al., 2022). La teoría de sistemas sociotécnicos es especialmente importante en la gestión del agua, puesto que enfatiza la necesidad de que el sector público y privado trabajen de manera coordinada para poder alcanzar el éxito en estas iniciativas (Teixeira et al., 2016; Valenzuela-Morales et al., 2023). Esta teoría propone, que para que se aplique la tecnología digital en la gestión del agua, es necesario adoptar un enfoque integral que contemple tanto los elementos técnicos como los elementos sociales y organizativos. En este sentido, aplicar dicha teoría implica aceptar que para afrontar los desafíos presentes y futuros en la gestión de agua es necesario desarrollar una estrategia holística que implemente el funcionamiento de las dinámicas sociales y la tecnología. Este enfoque permite una solución más integral y sostenible, a partir de la consideración no solo de una óptima eficiencia técnica, sino también de los impactos que genera en las comunidades y organizaciones en las que se basan dichas iniciativas.

### *1.2. Aplicaciones de agua digital*

Las aplicaciones de agua digital han revolucionado la gestión del agua, gracias a su capacidad para incorporar tecnológicas

que mejoran el uso y la calidad del agua. Entre estas aplicaciones destacan los sistemas de monitorización de la calidad del agua, los cuales utilizan sensores IoT para revisar diferentes parámetros, tales como la turbidez, el pH o el oxígeno disuelto en tiempo real. Esto permite a las ciudades identificar problemas de contaminación y actuar de forma rápida, asegurando que se garantice la potabilidad del agua. En esta línea, los sistemas de gestión de pérdidas constituyen la aplicación más utilizada para la detección de fugas y para mejorar la eficiencia en la distribución de agua, por lo que contribuyen al uso sostenible del agua. En el sector agrícola, los sistemas de riego inteligentes están permitiendo un mejor manejo del agua mediante el uso de datos climáticos y sensores de humedad del suelo, mientras que las herramientas de predicción y planificación de la demanda hídrica ayudan a anticipar las necesidades de agua en las áreas en crecimiento. Por último, las soluciones para la gestión de las aguas pluviales, como los techos verdes, permiten una canalización de las aguas pluviales más eficiente, por un lado, reduciendo la posibilidad de inundaciones y, por otro lado, mejorando la calidad del agua al filtrar partículas contaminantes. Las aplicaciones no sólo hacen frente a los problemas del presente, sino que también sientan las bases para la gestión sostenible del agua en el futuro, como se indica en la Tabla 1.

## 2. Materiales y Metodos

El artículo se basó en una revisión sistemática y estructurada, utilizando dos motores de búsqueda académicos clave: SCOPUS y Web of Science, con ecuaciones de búsqueda definidas el 21 de marzo del 2024. En SCOPUS, se empleó la siguiente ecuación: TITLE-ABS ((digital W/5 water OR monitoring OR “artificial intelligence” OR “smart cit\*” OR “big data”) AND “Water management” AND (cities OR metropolis OR urban OR municipal\* OR city)). Esta búsqueda inicial arrojó 34 publicaciones, que se redujeron a una sola tras la aplicación de filtros específicos. Mientras que para la base de datos de Web of Science, se empleó la siguiente ecuación: (TI=( (digital W/5 water) OR monitoring OR “artificial intelligence” OR “smart cit\*” OR “big data”) AND TI =( “Water management”) AND TI =( cities OR metropolis OR urban OR municipal\* OR city)) OR (AB =( (digital W/5

water) OR monitoring OR “artificial intelligence” OR “smart cit\*” OR “big data”) AND AB =( “Water management”) AND AB =( cities OR metropolis OR urban OR municipal\* OR city)).

**Tabla 1.** Síntesis de investigaciones previas sobre agua digital

Autor (es)	Objetivo del estudio	Principales hallazgos
Lima <i>et al.</i> , 2019	Evaluar el riesgo de contaminación de acuíferos mediante un modelo de decisión multicriterio para priorizar áreas de intervención.	Se identificaron áreas prioritarias en la interfaz urbano-rural de Mar del Plata para guiar la gestión del agua.
Marín <i>et al.</i> , 2019	Evaluar los procesos hidrogeoquímicos y la calidad del agua subterránea, utilizando enfoques estadísticos multivariantes y un índice de calidad del agua.	Los resultados obtenidos fueron mediante análisis de componentes principales (PCA) y agrupamiento K-means, para clasificar la calidad del agua para consumo humano.
Silva <i>et al.</i> , 2022	Comprender los factores que afectan la calidad del agua de escorrentía en cuencas urbanas tropicales mediante análisis de correlación y componentes principales.	Se identificaron correlaciones significativas entre parámetros de calidad del agua de escorrentía y variables meteorológicas utilizando análisis de componentes principales (PCA).
Nunes <i>et al.</i> , 2020	Determinar el balance hídrico del Lago Paranoá mediante modelado matemático de sus subcuencas, considerando la variabilidad en la urbanización y el uso del agua.	Se utilizó el modelo SWAT para simular el balance hídrico de las subcuencas, permitiendo la estimación de flujos de áreas no monitoreadas.
More <i>et al.</i> , 2023	Evaluar tecnologías digitales para mejorar la gestión del agua influenciada por la minería mediante herramientas de muestreo electrónico y modelos predictivos en plantas de tratamiento de agua minera.	Se desarrollaron eMetsi y ML-GUI utilizando tecnologías como NFC y aprendizaje automático para optimizar el muestreo y análisis de agua influenciada por la minería en plantas de tratamiento.
Tsuji <i>et al.</i> , 2019	Evaluar la concentración de contaminantes en las aguas pluviales del área urbana de la cuenca de Lago Paranoá.	Se aplicó el modelo SWMM para simular el escurrimiento y estimar las cargas de contaminantes, destacando que la contaminación difusa es una fuente importante de contaminación en las aguas receptoras.
Silva <i>et al.</i> , 2018	Cuantificar el coeficiente de cultivo y la producción de biomasa a gran escala en agroecosistemas.	Se utilizaron imágenes Sentinel-2 y los modelos SAFER y Monteith para cuantificar el coeficiente de cultivo y la producción de biomasa.
Souza <i>et al.</i> , 2019	Evaluar la efectividad de diferentes ubicaciones de estanques de detención en la reducción de picos de flujo y mejora de la calidad del agua.	Se usó el modelo SWMM para evaluar la ubicación de estanques de detención, encontrándose que los estanques cercanos al desagüe son más eficientes.

**Tabla 1. Síntesis de investigaciones previas sobre agua digital**

Autor (es)	Objetivo del estudio	Principales hallazgos
Finkler <i>et al.</i> ,2018	Evaluar la calidad del agua en cuencas urbanas, mediante índices de calidad y análisis multivariante para mejorar la gestión de recursos hídricos y planificación ambiental.	Se usaron PCA y WQIs para analizar datos de calidad del agua, encontrando que las aguas urbanas están principalmente afectadas por aguas residuales domésticas e industriales.
Hamad <i>et al.</i> ,2020	Evaluar el estado del acuífero Nubio en el Oasis de Al Kufra, en términos de cantidad y calidad del agua.	Se analizaron 26 pozos y muestras de agua para evaluar el descenso del nivel de agua y la calidad química, revelando que el mal manejo del agua, más que los factores técnicos, afecta la sostenibilidad hídrica.
Farreny <i>et al.</i> ,2013	Evaluar el metabolismo hídrico, la intensidad de uso del agua y el potencial de autosuficiencia hídrica mediante captación de aguas pluviales en parques comerciales.	El estudio revela la ineficiencia en el uso del agua y el potencial de satisfacer la demanda con agua lluvia en parques comerciales a partir de los parámetros medidos.
Siqueira <i>et al.</i> ,2019	Evaluar el riesgo de inundaciones urbanas en la cuenca del Córrego Cachoeirinha (Belo Horizonte, Brasil) mediante la creación de un gráfico de riesgo.	Utilizando la modelación hidrológica SWMM, validado con datos locales, para definir niveles de alerta basados en volumen y duración de lluvias acumuladas.
Passos <i>et al.</i> , 2021	Evaluar los parámetros representativos de la calidad del agua en la cuenca del río Doce, en Brasil, considerando su variabilidad estacional y espacial.	Se usaron el análisis de componentes principales (PCA) y análisis de clúster jerárquico (HCA) para reducir variables y agrupar estaciones, facilitando la gestión de la calidad del agua en la cuenca del río.
Jurado <i>et al.</i> ,2021	Evaluar la capacidad de autodepuración de seis ríos en la provincia de Salta, mediante análisis quimiométrico para caracterizar fuentes de contaminación y sus variaciones espaciotemporales.	Se analizaron 27 parámetros en 190 muestras de agua en Salta (2017-2019). Se identificaron variaciones significativas en la calidad del agua, destacando fuentes de contaminación urbana, industrial y agrícola mediante PCA.
Caro-Camargo <i>et al.</i> ,2023	Evaluar la gobernabilidad del agua en cuencas rurales Colombia, mediante el análisis de indicadores para mejorar la planificación y gestión de los recursos hídricos.	Se desarrolló el Índice de Gestión de Cuencas Rurales (GWI) en cuatro municipios de Boyacá y mejorar la planificación sostenible de los recursos hídricos.
Leta <i>et al.</i> ,2021	Evaluar los efectos históricos y futuros del cambio de uso de suelo en los parámetros hidrológicos de la cuenca Nashe, ubicada en la cuenca del río Nilo Azul.	Se utilizó el modelo SWAT para simular diferentes escenarios, encontrando un aumento del 2.33% en la escorrentía superficial y disminución en el flujo subterráneo.

Tabla 1. Síntesis de investigaciones previas sobre agua digital

Autor (es)	Objetivo del estudio	Principales hallazgos
Fouzi <i>et al.</i> ,2020	Evaluar la evolución espaciotemporal de los parámetros fisicoquímicos del agua del río Moulouya y sus principales tributarios en Marruecos.	Se identificó una tipología espacial dominante en la calidad del agua mediante análisis inter- e intraclase, lo que permitirá mejorar la gestión de cuencas hidrográficas en Marruecos.
Dantas <i>et al.</i> , 2020	Evaluar la calidad del agua superficial en la cuenca hidrográfica del río São Francisco en Minas Gerais, mediante el análisis de indicadores de contaminación fecal a lo largo de un período de 18 años.	Se identificaron diferencias significativas en la concentración de contaminación fecal entre subcuencas mediante análisis estadísticos.
El-Rawy <i>et al.</i> ,2021	Analizar el uso de tecnologías inteligentes para mejorar la productividad de los cultivos de dátiles y la eficiencia del agua en los países de la región MENA.	Se propuso un sistema de detección temprana de la infestación por el picudo rojo mediante tecnología IoT y técnicas de simulación en MATLAB para optimizar el manejo del riego y la identificación de plagas.
Guermazi <i>et al.</i> ,2019	Analizar el impacto de los cambios climáticos y antropogénicos en la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en una cuenca situada en un entorno árido.	Se desarrolló un marco integrado por un modelo hidrogeológico y técnicas de teledetección para evaluar la disponibilidad futura de recursos hídricos subterráneos.
Hu <i>et al.</i> ,2022	Evaluar los instrumentos de JPL y los derivados del European ECOSTRESS Hub, para validar la precisión y aplicabilidad de herramientas para la gestión de recursos hídricos.	Se validaron los instrumentos LST de ECOSTRESS comparándolos con mediciones in situ en 9 sitios en Europa y África. Esta evaluación, con un RMSE de aproximadamente 2 Kelvin.
Abdel-Fattah <i>et al.</i> ,2020	Evaluar la calidad del agua de riego del canal Bahr Mouise en El-Sharkia, utilizando análisis multivariado para desarrollar un índice simplificado que clasifique la calidad del agua en diferentes temporadas.	Se desarrolló un nuevo método de clasificación de calidad del agua mediante análisis de componentes principales (PCA) y agrupamiento jerárquico aglomerativo (AHC) para evaluar la calidad del agua.
Eid y Shaltout, 2017	Desarrollar un modelo numérico dinámico para describir la producción de biomasa e interacciones de <i>Eichhornia crassipes</i> en canales de riego del Delta del Nilo.	Se validó un modelo para simular la biomasa de <i>E. crassipes</i> , sugiriendo su uso en la gestión de canales de riego y control de esta planta invasora, optimizando los recursos hídricos.
Temesgen, 2023	Examinar el desarrollo del sistema de captación de agua de lluvia en la cuenca de Haramaya, evaluando el índice de concienciación.	Se utilizó un diseño de investigación explicativa con análisis cuantitativo para medir el índice de concienciación sobre el sistema de captación de agua de lluvia y proponer soluciones de gestión para abordar sus desafíos.
Mendoza-Espinosa y Daesslé, 2018	Consolidar el uso de agua reciclada para riego y filtración en el valle agrícola semiárido de Baja California, México, como una opción de gestión hídrica sostenible.	Se estableció un programa de monitoreo de calidad del agua que garantizó el cumplimiento de los estándares, identificando la necesidad de mejorar el control de la planta de tratamiento de aguas residuales.

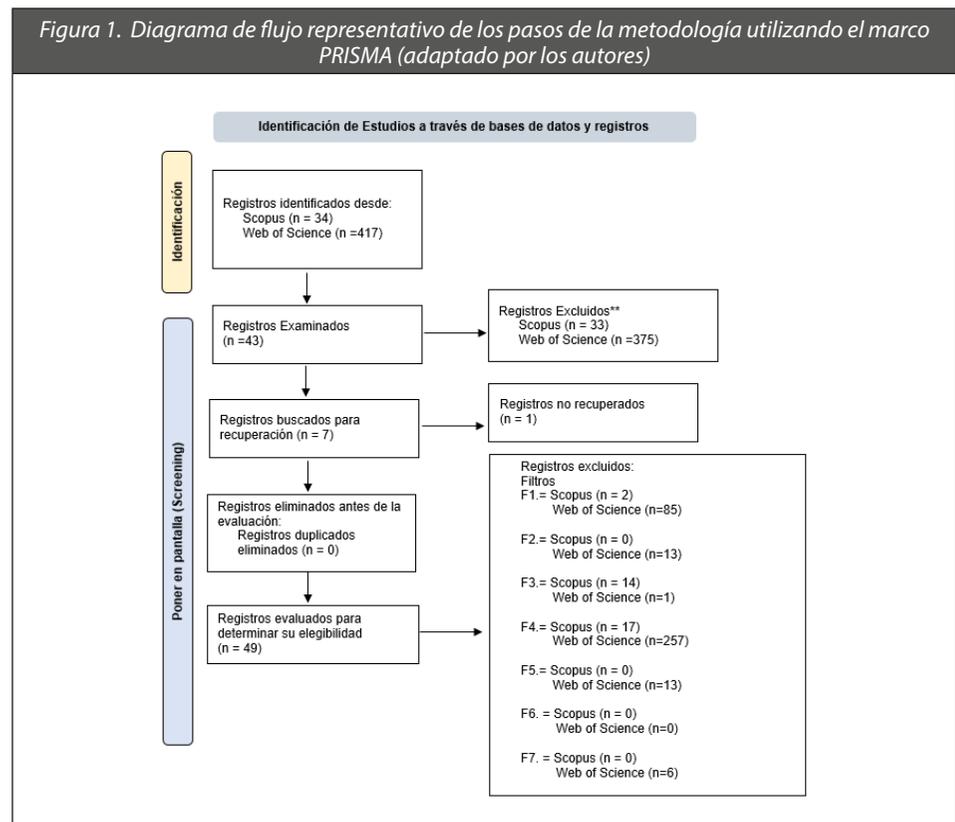
Esta búsqueda inicial identificó 417 publicaciones y tras aplicar los mismos filtros que en SCOPUS, el número se redujo a 49 publicaciones. La elección de estos términos específicos se basó en la necesidad de abarcar diversas facetas de las iniciativas de agua digital en contextos urbanos.

Términos como “digital water” y “monitoring”, junto con operadores de proximidad W/5 y el comodín “”, se consideraron tras pruebas preliminares que mostraron su eficacia en recuperar documentos relevantes. Los términos y operadores expuestos han sido seleccionados de acuerdo con la pregunta de investigación sobre planificación de ciudades sostenibles mediante la gestión inteligente del agua. A continuación, se ha seleccionado el operador de proximidad W/5 con el fin de asegurar que los términos relevantes, tales como “digital” y “water”, fueran suficientemente próximos en los textos a consultar para así garantizar el contexto y la pertinencia de los resultados obtenidos en el proceso de búsqueda. Este operador permitió hallar documentos en los cuales los términos indicados aparecían a una distancia máxima de cinco palabras entre sí. Este operador es de utilidad para capturar estructuras tales como “digital water management” o “monitoring digital water”. Esta proximidad también contribuyó a mejorar la precisión de la búsqueda ya que, combinando estos términos, se lograba filtrar documentos que, aun conteniendo esos dos términos, no se encontraban directamente relacionados con el enfoque de la revisión. Asimismo, se utilizaron los comodines “” para tener en cuenta variaciones de los términos que aparecen como “smart cities”” y “smart city”. El uso de estos comodines permitió comprender conceptos sustantivos que pueden referirse a las temáticas de estudio, aunque de una manera ligeramente distinta, al tiempo que la exhaustividad de la búsqueda se incrementó.

Antes de tomar decisiones sobre las ecuaciones finales, se discutieron opciones que incluían un mayor número de palabras clave que fueran pertinentes y estuvieran relacionadas con el tema que aborda la revisión. Estas ecuaciones iniciales incluían muchos más documentos, Esto provocaba que la revisión se extendiera en el tiempo, perdiendo el enfoque en el problema principal que se buscaba analizar. Las ecuaciones finales son de carácter mucho más

conciso y específico, permitiendo así una selección más certera de estudios que son pertinentes, sin comprometer la calidad y la precisión del análisis realizado en la revisión. Para obtener la muestra final de documentos se implementaron una serie de filtros exigentes, orientados a garantizar la adecuada selección de aquellos documentos que en el análisis final se consideraran como de mayor relevancia y calidad. Entre ellos se incluyeron la limitación de la búsqueda a publicaciones de los últimos 10 años (2014-2023) (F1), el requisito de idioma en inglés (F2), la exclusión de artículos que no fueran del tipo “artículos” o “revisiones” (F3), la exclusión de documentos de regiones no relevantes distintas a las regiones de Latinoamérica y África (F4), la exclusión de aquellos artículos que no estaban disponibles para descarga completa (F5), la verificación del contenido para asegurar relevancia al tema de interés (F6) y la eliminación de documentos duplicados entre bases de datos (F7), como se muestra en la Figura 1. Cada uno de estos filtros fue seleccionado por razones específicas, las cuales se detallan a continuación.

Figura 1. Diagrama de flujo representativo de los pasos de la metodología utilizando el marco PRISMA (adaptado por los autores)



La limitación de la búsqueda a los últimos 10 años (F1) se debe a la rápida evolución de las tecnologías digitales. En la última década, se ha producido un importante avance en la utilización de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el Big Data y las ciudades inteligentes en la gestión del agua. La elección de un periodo de diez años permite encontrar un equilibrio entre incluir los estudios suficientemente relevantes y evitar incluir estudios desactualizados, sin acudir a periodos más cortos. Por otra parte, la opción de limitar la búsqueda a publicaciones en inglés (F2) surgió a partir de la premisa de que gran parte de la investigación científica de mejor impacto y más citada se publica en este idioma. A pesar de que se ha reconocido que existían publicaciones relevantes en español y portugués, en especial en las zonas de interés como América Latina y África, la inclusión de que solo fueran documentos en inglés garantizaba mejor accesibilidad y validez de los estudios revisados. Junto a ello, se excluyeron libros y documentos de conferencias dado que son muchos los documentos que no tienen el acceso libre, lo que limita a su accesibilidad para una revisión exhaustiva, por lo que se consideró que revisiones sistemáticas y artículos de investigación (F3) son más adecuados para proporcionar evidencia sólida y relevante sobre las iniciativas de agua digital. También se excluyeron artículos que no estaban disponibles para descarga completa (F5) en acceso a toda la información necesaria para realizar una evaluación completa y detallada de los estudios. La posibilidad de no disponer del texto completo podría traducirse en una interpretación sesgada o incompleta de los resultados que se informan en los resúmenes.

De forma similar se excluyeron documentos de regiones distintas a Latinoamérica y a África (F4). Asumir que estos contextos, especialmente en lo relacionado con las condiciones sociales y económicas, se equipararían a los de las regiones que enmarcan el problema de estudio sería un error en el análisis. Se seleccionó a las regiones de Latinoamérica y de África por sus posibilidades de aplicación de innovaciones tecnológicas frente a una crisis de disponibilidad de agua que responden al requerimiento, de manera inmediata, fortaleciendo sus capacidades urbanas. Las experiencias en estas áreas de aplicación generan modelos que pueden replicarse y adaptarse en otros espacios del mundo, como en el caso de Colombia.

Los procedimientos para la detección de duplicación (F7) se llevaron a cabo de forma rigurosa. La reducción de la información encontrada en las bases de datos no arrojó duplicaciones significativas en la comparación entre las dos bases, pero dada la situación de arranque, se construyó un filtro previo a la exclusión en una parte de la revisión realizada en una etapa posterior, una vez que ya habíamos reducido la muestra. Esto fue lo que nos permitió, en un primer momento, la garantía de la eliminación de duplicados. En cuanto a la extracción y análisis de los datos se emplearon matrices en Excel, sintetizando los resultados de los estudios seleccionados. De la misma forma, se elaboró un cuestionario para evaluar la pertinencia de las iniciativas o estrategias de agua digital en las ciudades de los países de Latinoamérica y África orientadas a la sostenibilidad. Las preguntas que contenía el cuestionario eran las siguientes: ¿La iniciativa tiene el potencial de ser escalada o replicada en otras ciudades o regiones? ¿Presenta datos cuantitativos que muestren el impacto de la iniciativa o estrategia en términos sociales, técnicos, ambientales y económicos? ¿La iniciativa utiliza tecnologías innovadoras específicas? ¿Involucra a la comunidad local en su diseño, implementación o monitoreo? y ¿Incluye colaboraciones con otras organizaciones, instituciones académicas o el sector privado? El sistema de asignación de puntuaciones se basó en comparar cada artículo con estas intervenciones utilizando dos opciones, es decir si el artículo cumple con la pregunta la posibilidad de dar un SI y si no la opción de dar un NO, lo que permitió posteriormente contar el número de respuestas afirmativas del artículo y clasificarlo en tres categorías: Información Relevante (al menos 5 preguntas con respuesta afirmativa), Moderadamente relevante (4 preguntas con respuesta de SI), poco relevantes (2 a 3 preguntas con respuesta de SI). Este tipo de sistema de puntuación sirvió para construir una categorización de las iniciativas estructurada que ayudó a hacer una comparación para la relevancia e impacto de cada una de ellas en la sostenibilidad urbana.

Para evaluar la influencia de iniciativas de agua digital sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se definieron criterios específicos basados en los siguientes objetivos: ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), que incluye indicadores como la reducción

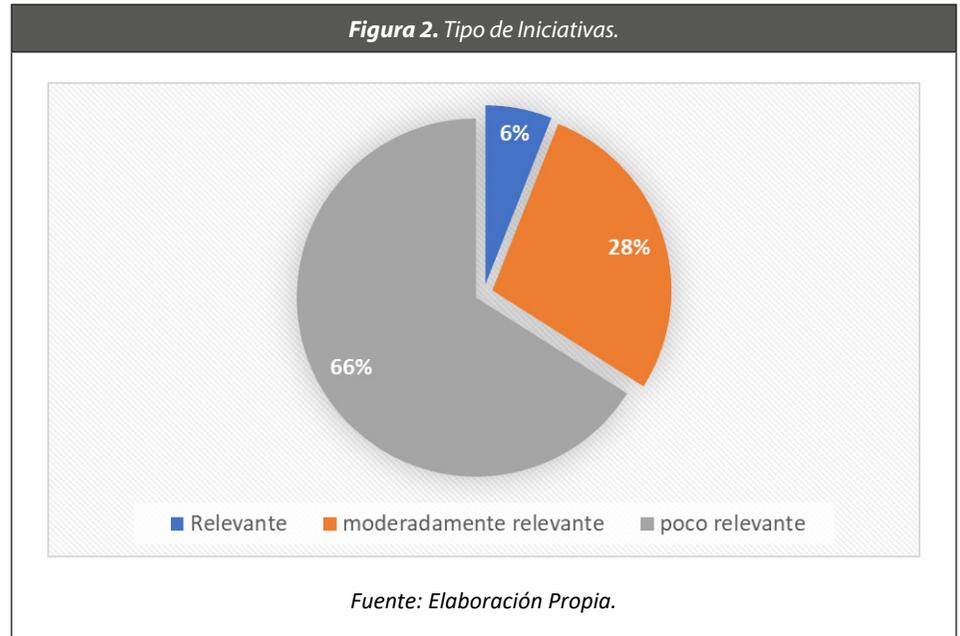
en el consumo de agua, mejora en la calidad del agua y aumento en el acceso al agua potable; ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), con implementación de tecnologías innovadoras, mejora en la eficiencia de infraestructuras de agua, e inversiones en tecnologías digitales para la gestión del agua; ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), centrado en la resiliencia urbana ante la escasez de agua, mejora en la gestión de recursos hídricos urbanos, y reducción del riesgo de desastres relacionados con el agua; ODS 13 (Acción por el clima), donde se valora la reducción de la huella hídrica y adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos; ODS 14 (Vida submarina), enfocado en la conservación de ecosistemas marinos y reducción de la contaminación en cuerpos de agua; y ODS 17 (Alianzas para lograr los objetivos), con énfasis en colaboraciones internacionales y transferencia de tecnología. El sistema de asignación de puntajes se orientó a comparar cada artículo con los objetivos que buscaba, para identificar aquellos que eran tratados con éxito (SI) y aquellos que no lo eran (NO).

Así, se generó la clasificación atendiendo al número de ODS que se abordaba, y se establecieron las categorías puntuables de Muy Alto Impacto (5-6 ODS), Alto Impacto (4 ODS), Moderado Impacto (3 ODS), Bajo Impacto (2 ODS) y Muy Bajo Impacto (0-1 ODS). Los tipos de tecnologías digitales y de desafíos también eran aspectos que se identificaban con la lectura, la población objetivo beneficiada por la aplicación de iniciativas de agua digital y, por último, las funciones de los organismos públicos y privados en la aplicación y funcionamiento de las tecnologías de agua digital de las ciudades de las regiones consideradas fueron analizados. Este enfoque permitió establecer una metodología organizada para llevar a cabo una evaluación minuciosa y precisa de cada estudio, fortaleciendo así la calidad y la confiabilidad de los resultados obtenidos en la revisión bibliográfica.

## 4. Resultados y Discusión

### *4.1. Iniciativas y estrategias de agua digital en ciudades latinoamericanas y africanas*

En la Figura 2 se visualizan los resultados del análisis bibliográfico en torno a iniciativas y estrategias de agua digital en ciudades de Latinoamérica y África, donde se evaluaron indicadores como el potencial de replicación de la iniciativa en otras ciudades o regiones, criterio importante para determinar su viabilidad en el tiempo, así como datos cuantitativos evaluados, tanto para el impacto técnico como para el impacto ambiental, ambos claves para medir la efectividad de la estrategia. La evaluación del uso de nuevas tecnologías en iniciativas y su potencial para ser replicadas también se consideraron a la hora de determinar la sostenibilidad de la misma, dado que la innovación tiene un rol importante en la gestión del agua sostenible. Por otro lado, se evaluó la inclusión o participación de la comunidad local en el diseño, la implementación o el monitoreo de las iniciativas, lo que también sugiere un enfoque adaptado a las necesidades locales y mejora las posibilidades de éxito en el tiempo. Los resultados muestran diversos niveles de cumplimiento de los indicadores evaluados. También, se encontró que solo dos documentos (6%) de los seleccionados para su revisión cumplían con los cinco indicadores claves que ya hemos definido, sugiriendo un alto nivel de relevancia, incluso de potencial impacto para que sus iniciativas puedan ser escaladas o replicadas en otras regiones.



Un hallazgo relevante es el estudio realizado por Madonsela et al. (2019) en Ciudad del Cabo, Sudáfrica, que se catalogó como Relevante porque trata la implementación de un diseño sostenible relacionado con el agua para la escasez, el tratamiento de efluentes y el riesgo de inundación. Utiliza tecnologías de smart monitoring y los sistemas de información geográfica (SIG) para que la gobernanza del agua pueda ser evaluada a partir del Enfoque City Blueprint, metodología que examina políticas y prácticas que se plasman en la gestión del recurso hídrico poniendo especial énfasis en la participación comunitaria y la colaboración interinstitucional. Otro estudio importante fue el de Bouhout et al. (2024) mediante métodos avanzados de geoestadística (Kriging Disyuntivo) y modelos de la interpolación espacial para así predecir las concentraciones de nitratos en aguas subterráneas en la llanura Ghiss-Nekor, situado al noreste de Marruecos. Cabe mencionar que ambos emplean unas tecnologías innovadoras concretas, una participación de la comunidad local y muy buena colaboración con las universidades y con administraciones locales y una comunidad involucrada con ello, para así incrementar los efectos de sus estudios.

En comparación con estos hallazgos, el 28% de los documentos clasificados como “Moderadamente relevantes” se da por cumplir

de tres a cuatro indicadores, lo cual implica que hay un impacto importante (aunque limitado); estas iniciativas están marcadas por un elevado potencial en cuanto a la integración de la comunidad con el empleo de tecnologías innovadoras. En cambio, encontramos que el 66% de los documentos revisados fueron clasificados como “poco relevantes”, lo cual refleja un impacto limitado en lo que a sostenibilidad se refiere; esta escasa clasificación puede venir derivada por diferentes motivos clave. Por ejemplo, una gran parte de estos estudios pone el foco únicamente en los aspectos técnicos o ambientales, dejando de lado las dimensiones social y económica, que son esenciales para una gestión hídrica integral, además de carecer de la participación activa de la comunidad en el diseño e implementación de las iniciativas. Del mismo modo, algunas de las investigaciones no incluían datos cuantitativos que indiquen el impacto de esta en términos técnicos y ambientales, por lo que es difícil gestionar su efectividad.

Muchos de los documentos tampoco presentan la inclusión de tecnologías innovadoras específicas necesarias para dar respuesta a los problemas que deben enfrentarse actualmente en la gestión del agua. Los resultados obtenidos de la revisión de documentos muestran una tendencia muy preocupante dado que la clasificación de muchos documentos está marcada por “poco relevantes”, por lo que gran parte de las investigaciones sobre iniciativas de agua digital en América Latina y África no están teniendo un impacto significativo en términos de sostenibilidad. Esta tendencia responde a dos factores críticos: la falta de un enfoque integrador que tenga las dimensiones social, económica y ambiental que limiten la efectividad de las iniciativas a proponer; por el contrario, otros estudios solo contemplan los aspectos técnicos olvidando la participación de las comunidades, que se ha mostrado un aspecto esencial en la adopción y la potenciación de las iniciativas a implementar; y, al final, mucho menor la colaboración interinstitucional por la carencia de la transferencia de recursos y conocimientos para enriquecer los enfoques a seguir y maximizar el impacto de las iniciativas de gestión hídrica.

Para la investigación de iniciativas de agua digital que estamos llevando a cabo estos hallazgos muestran la urgencia de favorecer

una colaboración mayor de los distintos actores en la gestión del agua (gobierno, universidades y comunidades locales). Además, también se requiere una investigación más amplia de los marcos de investigación integrada que tengan múltiples dimensiones de la sostenibilidad y que garanticen que las iniciativas son tecnológicamente viables, pero también necesarias desde una perspectiva social, facilitando el desarrollo de soluciones adaptadas a las condiciones locales y que impulsen un cambio real y significativo.

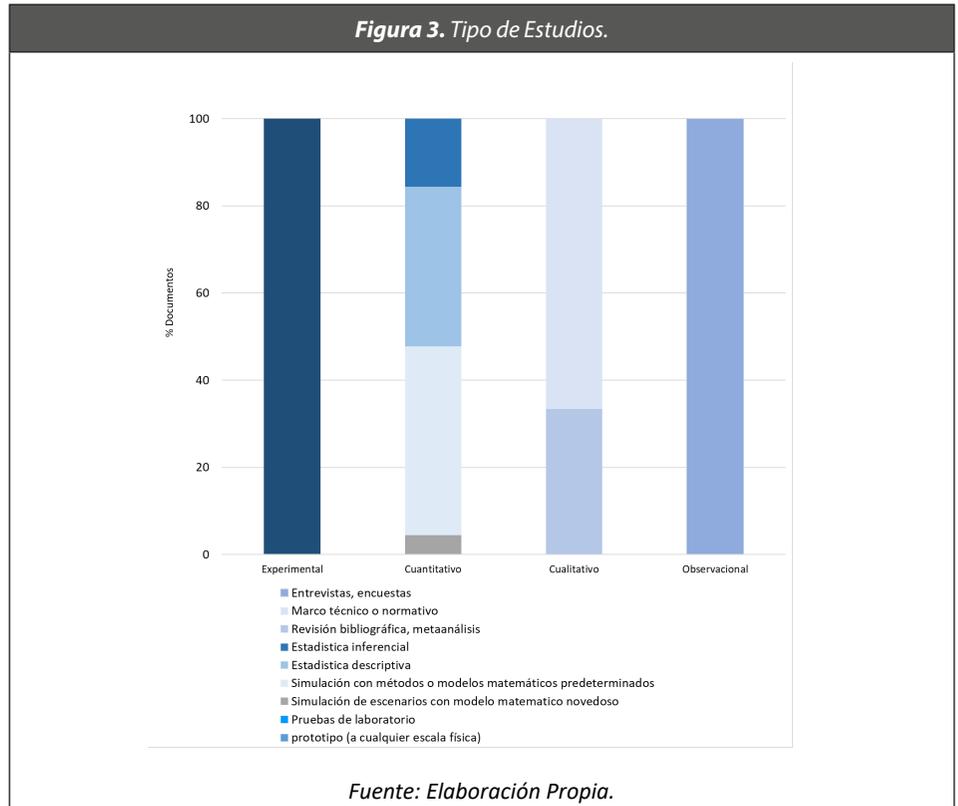
#### *4.2. Categorización de estudios*

Para que la distribución de la investigación sobre recursos hídricos quede bastante clara, los estudios que hemos analizado los organizamos en una serie de categorías, donde encontramos que estos estudios se pueden clasificar en dos categorías principales, “Experimental” y “Cuantitativo”. La categorización es importante porque cada tipo de estudio hace frente a problemas que se refieren al agua, pero con diferentes metodologías utilizadas.

En la categoría “Experimental”, encontramos dos subcategorías, los estudios de prototipos a distintas escalas físicas y las pruebas de laboratorio. Un estudio clave para la investigación realizada por Baptista et al. (2023) que se interesa por el diseño e implementación de sistemas de recolección de agua de lluvia en las ciudades en los ambientes urbanos tropicales: el estudio de Baptista et al. (2023) ha desarrollado prototipos que se integran utilizando tecnologías de captación y de almacenamiento de agua que, posteriormente, han sido evaluadas en cuanto a su rendimiento sobre la recarga de acuíferos y la mitigación de inundaciones. Este estudio se clasifica como experimental porque supone la construcción de prototipos reales que son probados en condiciones reales. Dichos elementos se pueden colocar en los techos de los edificios, incluyendo almacenamiento subterráneo y un tratamiento básico para su uso posterior. También este enfoque permite ver lo que se hace y ajustar el diseño a las dificultades locales, aportando información empírica sobre la eficiencia de los sistemas analizados.

La categoría “Cuantitativa”, por su lado, es la que incluye estudios que usan simulaciones de escenarios: la simulación de escenarios

que emplean modelos aplicados en el estudio, estas simulaciones de escenarios que usan modelos predefinidos y desarrollados específicamente para el estudio en cuestión. Se menciona como ejemplo, de forma significativa, el estudio que presenta Bouhout et al. (2024), el cual busca determinar la cantidad de filtración de nitratos y, por ende, determinar el riesgo de contaminación de un acuífero aluvial, aplicando modelos matemáticos. Este estudio es un ejemplo de cuantitativo porque, al evaluar el riesgo de contaminación, se emplean técnicas de estadísticas avanzadas que permiten modelar datos y generar resultados numéricos, lo que permite evaluar adecuadamente el riesgo de contaminación. Esto último es necesario para poder tomar decisiones que ayuden a la gestión del agua. En la Figura 3, se puede ver la distribución de los tipos de estudios que fueron analizados, permitiendo hacerse una idea de aquéllos con los cuales se ha contado para las investigaciones del ámbito de agua digital, así como posibles soluciones en estos. Cada uno de los enfoques aporta conocimientos, desde los de creación y prueba de prototipos en estudios experimentales, pasando por la recolección de percepciones en el estudio cualitativo o el empleo de datos en las que se recoge el estudio observacional, lo que implica que la mezcla entre estos enfoques es un aspecto importante a la hora de dar solución a los retos complejos que están relacionados con la gestión del agua y la mejora de la calidad del recurso hídrico.



Además, se pudo comprobar que, en el enfoque cuantitativo, las pruebas de laboratorio son el 90% de las técnicas que se aplican, muestra de la importancia de los métodos empíricos en esta forma de realizar la investigación. En el enfoque cualitativo, la estadística descriptiva tiene una presencia del 80%, lo que es también relevante para la interpretación de datos, puesto que se ha de incidir en la comprensión de percepciones y experiencias. Un estudio ilustrativo es de Souza et al. (2021) en el que se analizó la efectividad del marco de gestión hídrica en ríos en Brasil, a través de encuestas dirigidas a miembros de los comités de cuenca y de la Agencia Nacional de Agua, con el objetivo de conocer su percepción sobre la calidad del agua y los retos que enfrentan en la implementación de políticas. Se trata de un estudio cualitativo porque pone el foco en las percepciones y experiencias de los gestores, lo que permite examinar en profundidad las dificultades y oportunidades de la gestión hídrica.

Finalmente, la categoría “Observacional” incluye estudios que analizan datos existentes. Se trata de un estudio relevante realizado por Araujo de Brito et al. (2021) en torno a datos de la sequía en

Brasil a lo largo de tantos años, recolectando datos de monitoreo para entender cuál es la tendencia y analizar patrones de sequías en las diferentes regiones, es un estudio que se clasifica como observacional porque está basado en la recolección y análisis de datos a un nivel descriptivo y sin manipulación de variables. Adicionalmente también se realizaron entrevistas a expertos y encuestas a poblaciones afectadas que dieron información adicional sobre el impacto de la sequía en las comunidades locales.

#### 4.2.1 Tipos de tecnologías digitales aplicadas

El uso de tecnologías digitales en la gestión del agua ha incrementado en los últimos años, estableciendo herramientas que posibilitan una vigilancia más eficaz y competitiva de los recursos hídricos. Esta revolución es de gran importancia ya que, teniendo en cuenta que la gestión del agua de una manera sostenible, es fundamental para el urbanismo y el desarrollo rural en lugares donde la escasez hídrica supone un problema creciente. En la Figura 4, puede observarse una tendencia relativamente baja hacia el uso de modelos de simulación y predicción, ya que suponen el 29% de los documentos analizados en esta área. Estas herramientas digitales, como por ejemplo EPANET (Extended Period Simulation para Análisis de Redes), un software diseñado para modelizar las redes de distribución de agua, y el SWMM (Storm Water Management Model), que se emplea para gestionar y simular el escurrimiento de aguas pluviales, son determinantes para establecer la proyección de variables críticas como la calidad del agua y la distribución hídrica, además permiten realizar análisis sobre la carga de los contaminantes y sus impactos en el agua, resultando así de gran ayuda para gestionar los recursos hídricos.

Por ejemplo, el trabajo de Bonilla et al. (2023) realizado en Pamplona, Colombia, el cual utilizó EPANET para realizar un modelo hidráulico de la red de distribución de agua, lo que posibilitó realizar simulaciones que optimizaron la gestión del sistema hídrico, en un contexto en el que el presupuesto es escaso. Este trabajo destaca como el uso de EPANET tiene gran capacidad para evaluar la operación y predecir problemas en el sistema de infraestructuras de agua de las ciudades, factores que pueden marcar la diferencia

en la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de abastecimiento de agua. A la vez, el modelo SWMM (en inglés: “Storm Water Management Model”) fue implementado en estudios como el de Tsuji et al. (2019) para caracterizar la escorrentía pluvial y la carga de contaminantes en cuencas urbanas de Brasil. Este estudio permite evaluar la afectación de la contaminación difusa en cuerpos de agua receptores. Las simulaciones demuestran en este caso el grado de afectación de las áreas urbanas en la carga de fósforo y sólidos suspendidos totales, constituyendo una valiosa base para decidir las medidas de mitigación y control que son relevantes para la salud pública y la protección del medio ambiente.

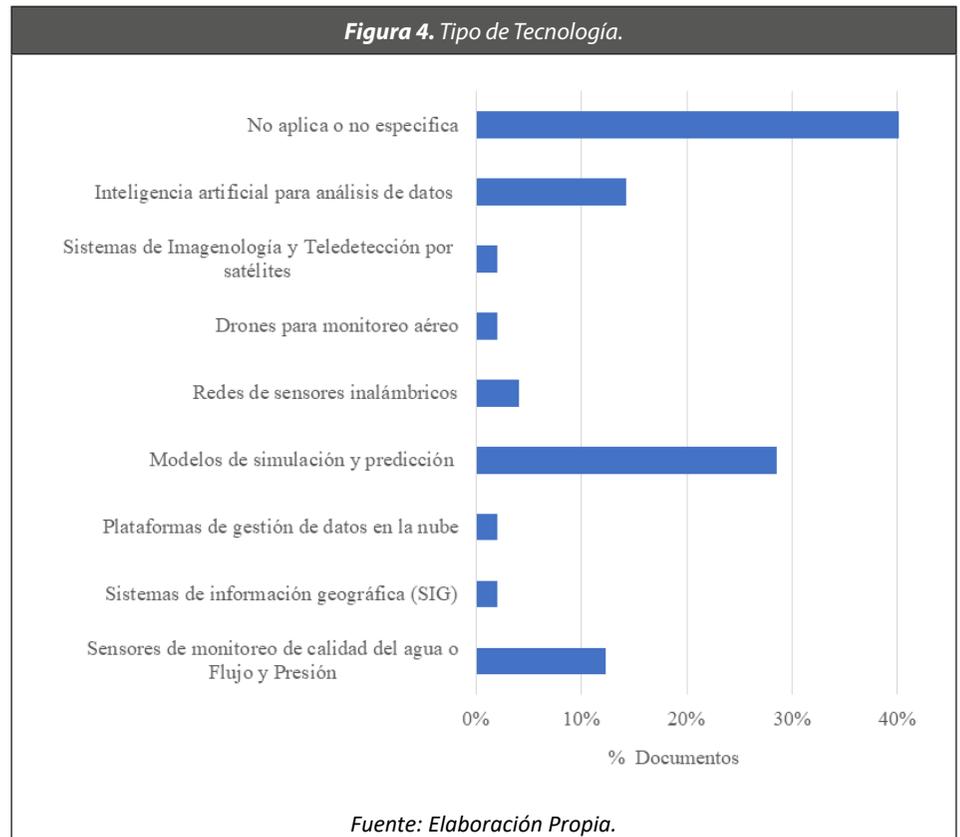
Otro estudio relevante es el de Furtado et al. (2021), estos últimos llevaron a cabo la evaluación de las cargas de fósforo total y sólidos suspendidos totales con el modelo SWMM en la rehabilitación de la Lagoa da Pampulha, en Belo Horizonte, Brasil. Este análisis muestra, incluso con escenarios optimistas, que la reducción de carga contaminante no ha sido suficiente para garantizar la rehabilitación del lago. Este hallazgo destaca la importancia de las simulaciones junto con las mejoras estructurales y las mejoras en las prácticas de gestión como elementos centrales para conseguir objetivos a largo plazo en la gestión del agua.

Estos ejemplos muestran cómo la elevada adopción de modelos de simulación como EPANET y SWMM subrayan su interés en la planificación y en la toma de decisiones en el ámbito hídrico. En un contexto donde la complejidad y la precisión son imprescindibles para gestionar los recursos de manera eficiente y sostenible, estas herramientas se convierten en imprescindibles. Además, se observó cómo, en segundo lugar, la utilización de inteligencia artificial (IA) aplicada al análisis de datos corresponde al 14% de la literatura analizada, lo que evidencia el interés creciente en enfoques avanzados como algoritmos predictivos, Big Data, Machine Learning y Blockchain. Esto permite percibir que la aplicación de estas tecnologías está aportando y ayudando a transformar la gestión de recursos hídricos hacia una automatización más eficiente y mejores capacidades analíticas para el tratamiento de los datos. Por ejemplo, Alamoudi et al. (2023) realizan un estudio que se centra en la predicción de la susceptibilidad a inundaciones repentinas en Wadi

Qows empleando modelos de machine learning como Random Forest, LightGBM y CatBoost. El trabajo de Arias-Rodriguez et al. (2020) también utiliza machine learning para el monitoreo de la calidad del agua del embalse Valle de Bravo empleando información satelital que facilita una gestión más eficiente de los recursos hídricos. Hemdan et al. (2023) desarrollan un sistema de monitoreo de calidad del agua basado en IoT y machine learning con análisis en tiempo real que contribuyen a una mejor toma de decisiones. Finalmente, los autores More et al. (2023) muestran herramientas de gestión de agua para minas que aplican machine learning para optimizar el uso y la calidad del agua, dando ejemplos de la importancia que tiene la inteligencia artificial en la sostenibilidad de la minería.

Por otro lado, se encontró que tecnologías como los sistemas de información geográfica (SIG), las plataformas de gestión de datos en la nube y el uso de drones para monitoreo aéreo presentan una adopción relativamente baja, cada una con solo un 2% de representación en los documentos revisados. Esto implica que, aunque estas tecnologías tienen un gran potencial para mejorar la gestión hídrica, su implementación aún es limitada. Una posible explicación es que estas limitaciones podrían incluir barreras tecnológicas, falta de infraestructura o desafíos en la percepción de su costo-beneficio.

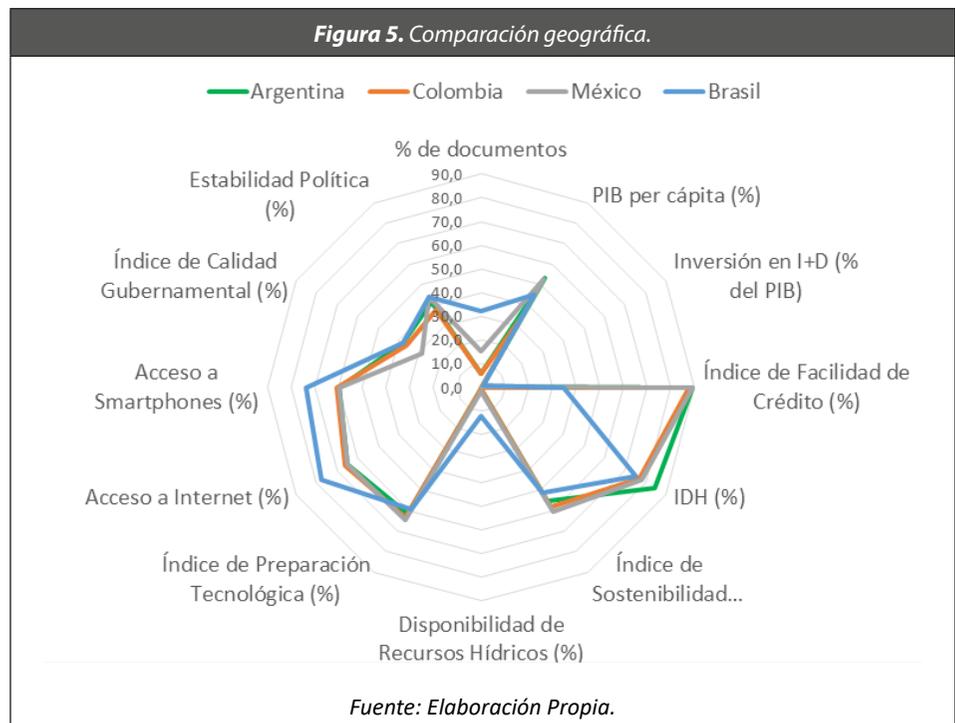
Al contextualizar estos resultados dentro del marco teórico de la gestión sostenible del agua, se evidencia que los modelos de simulación y la inteligencia artificial están alineados con las necesidades actuales del sector, que incluyen la gestión eficiente de recursos en un contexto de cambio climático y urbanización. Sin embargo, se observó que la menor adopción de tecnologías emergentes como la teledetección por satélite y las redes de sensores inalámbricos, críticas para la gestión en tiempo real y la recopilación de datos remotos, refleja una discrepancia que podría estar relacionada con desafíos en la implementación práctica o a la falta de conocimiento y capacitación en estas tecnologías.



#### **4.3. Factores determinantes en la implementación de tecnologías de agua digital**

La revisión reveló los factores clave en la gestión de los recursos hídricos en Argentina, Colombia, México y Brasil, permitiendo comparar las diferencias geográficas, niveles de desarrollo y contextos socioeconómicos entre estos países latinoamericanos, como se ilustra en la Figura 5. Brasil se destaca con el mayor número de publicaciones científicas sobre agua digital, representando el 32,1% del total de documentos revisados. Este liderazgo puede estar relacionado con su inversión en investigación y desarrollo (I+D), que asciende al 1,3% de su PIB, una cifra considerablemente mayor que la de Argentina, que tiene el 4,08% de las publicaciones y destina el 0,5% de su PIB a I+D; México, con el 12,24% de las publicaciones y una inversión similar del 0,5%; y Colombia, con el 6,12% de las publicaciones y solo el 0,2% de su PIB dedicado a I+D (UNESCO Institute for Statistics, 2022).

La significativa inversión de Brasil está alineada con su abundancia de recursos hídricos, que representan el 12% del total mundial, lo que le otorga una ventaja para implementar políticas tecnológicas e innovadoras en la gestión del agua. Por otro lado, la baja disponibilidad de agua en Argentina (0,4%) y Colombia (0,6%) resalta la urgencia de desarrollar estrategias más robustas y eficaces para la conservación y el manejo de sus recursos hídricos, adaptadas a la escasez en sus respectivos contextos (World Bank, 2020).



El PIB per cápita de Argentina y México es similar, con un 54% y un 53%, respectivamente, lo que indica una capacidad económica para potencialmente apoyar la inversión en el sector hídrico. En lo que se refiere a la capacitación y al conocimiento, los resultados de Argentina y México son mejores, ya que poseen un índice de facilidad de crédito alcanzando el 88,9% lo que conlleva a un entorno propicio para financiar la capacitación y la innovación (The World Bank Group, 2020). La evaluación también muestra que Argentina cuenta con una puntuación del índice de desarrollo humano del 84,5%, superior a la de México (77,9%) y Brasil (75,4%); en donde la población presenta

un más alto nivel en lo que se refiere a la educación y la calidad de vida (United Nations Development Programme, 2020). Estos aspectos son determinantes para la correcta implementación de políticas de la gestión hídrica, ya que, un nivel de educación más alto generalmente marca el comienzo de una mayor comprensión y conciencia sobre la sostenibilidad y conservación de los recursos hídricos. (United Nations Development Programme, 2020). La educación popular hace que los ciudadanos se impliquen más en la gestión del agua, que adopten prácticas de sostenibilidad, que colaboren con los planes de conservación. Una mayor educación de la ciudadanía hace que en la implementación de las políticas y en la implicación en la toma de decisiones que tienen que ver con la utilización del agua sea más fluida y con una mayor colaboración.

En lo que respecta a la infraestructura medioambiental, el país que cuenta con el mayor índice de sostenibilidad ambiental es México (60,5%), lo que evidencia que disponga de un entorno más favorable para proyectos sostenibles de la gestión del agua. Por otro lado, se encontró que Brasil, a pesar de su riqueza en recursos hídricos, enfrenta desafíos ambientales significativos con un índice de 51,2% (Yale Center for Environmental Law & Policy, 2020).

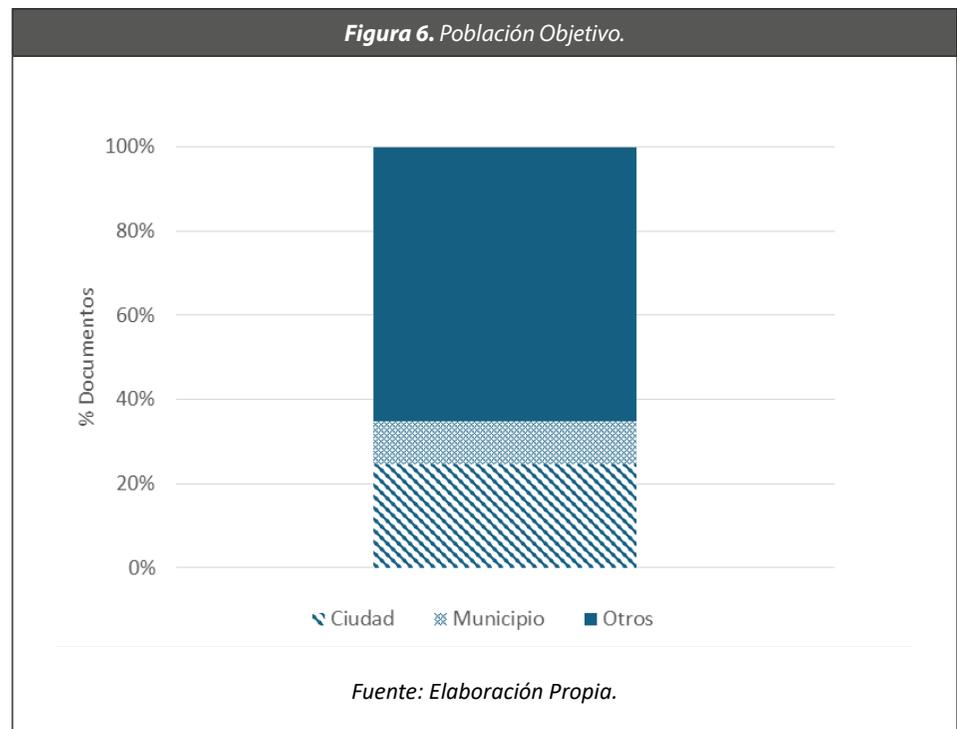
En comparación con el índice de preparación tecnológica, se muestra a México ligeramente a la delantera con un 64,3%, seguido de Colombia con 63,6%. Aunque Brasil cuenta con un acceso superior a Internet (77,5%) y uso de smartphones (73,8%), su Índice de Preparación Tecnológica es más bajo (59,3%), lo que podría limitar la adopción de tecnologías avanzadas en la gestión de recursos hídricos, a pesar de su amplio acceso a herramientas tecnológicas (World Economic Forum, 2020).

En el ámbito de políticas y regulaciones, Argentina y Brasil tienen un Índice de Calidad Gubernamental del 38%, reflejando una confianza moderada en sus instituciones. Esto sugiere que Brasil y México presentan una estabilidad política superior (44%), lo que podría facilitar la implementación de políticas hídricas sostenibles a largo plazo. Por su parte, Colombia presenta los índices más bajos de calidad gubernamental (36%) y estabilidad política (38%), por lo que enfrenta un entorno más desafiante para desarrollar e implementar políticas efectivas en la gestión hídrica (Transparency International, 2020).

#### 4.4. Impactos generados por el uso de iniciativas de agua digital

##### 4.4.1. Impactos en la población

La población objetivo de los estudios revisados resalta una clara preferencia por llevar a cabo investigaciones sobre la aplicación de herramientas de agua digital en áreas amplias y ambientalmente significativas, como las ciudades. Esto se debe a la alta densidad poblacional y la creciente demanda de agua que enfrentan estos entornos. Estas iniciativas no solo se centran en optimizar el uso y la distribución de los recursos hídricos, sino que también tienen como objetivo mejorar la calidad del agua y garantizar su disponibilidad a largo plazo. Estos factores son fundamentales no solo para el desarrollo sostenible, sino también para la salud pública en las áreas urbanas. A medida que las ciudades continúan creciendo y urbanizándose, la implementación de tecnologías digitales en la gestión del agua se vuelve cada vez más crítica. La figura 6 ilustra cómo estas prácticas pueden impactar de manera significativa en la sostenibilidad de los recursos hídricos y en la calidad de vida de sus habitantes.



Sin embargo, la mayoría de los estudios fueron clasificados como “Otros”, con un 65,3%, ya que se aplican a diferentes entornos geográficos, como cuencas hidrográficas (Madonsela *et al.*, 2019), donde se evaluaron los procesos de gobernanza del agua necesarios para implementar un Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD) en Ciudad del Cabo, en bahías (Mateus *et al.*, 2019), en el que se llevó a cabo el calidad del agua en la isla Santa Cruz del archipiélago de Galápagos, en valles (Kessasra *et al.*, 2017), en el que se abordaron los desafíos de gestión de recursos hídricos en el acuífero de Soummam en el noreste de Argelia, en lagos (Furtado *et al.*, 2021), en el cual se evaluó la reducción de cargas externas de fósforo total y sólidos suspendidos totales para la rehabilitación de la Lagoa da Pampulha en Belo Horizonte, Brasil., y en ríos (Mazari-Hiriart *et al.*, 2019), donde se identificaron los retos y oportunidades relacionados con la calidad del agua en la Ciudad de México.

Esto indica que existe una clara inclinación hacia la investigación de naturalezas que interrelacionan directamente con la gestión de recursos hídricos; permitiendo así poder entender mejor los ecosistemas acuáticos y su dinámica. La proporción de los municipios, que constituyen el 10,2% de la totalidad de documentos, denota un tratamiento más localizado donde se pueden ir aplicando soluciones a problemas específicos. Esta proporción indica el interés de conocer cómo se gestiona el agua a nivel de los municipios, probablemente debido a que para la gestión hídrica se pueden ir desplegando políticas que se puedan escalar y aplicar a otros contextos.

#### 4.4.2. Impactos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible

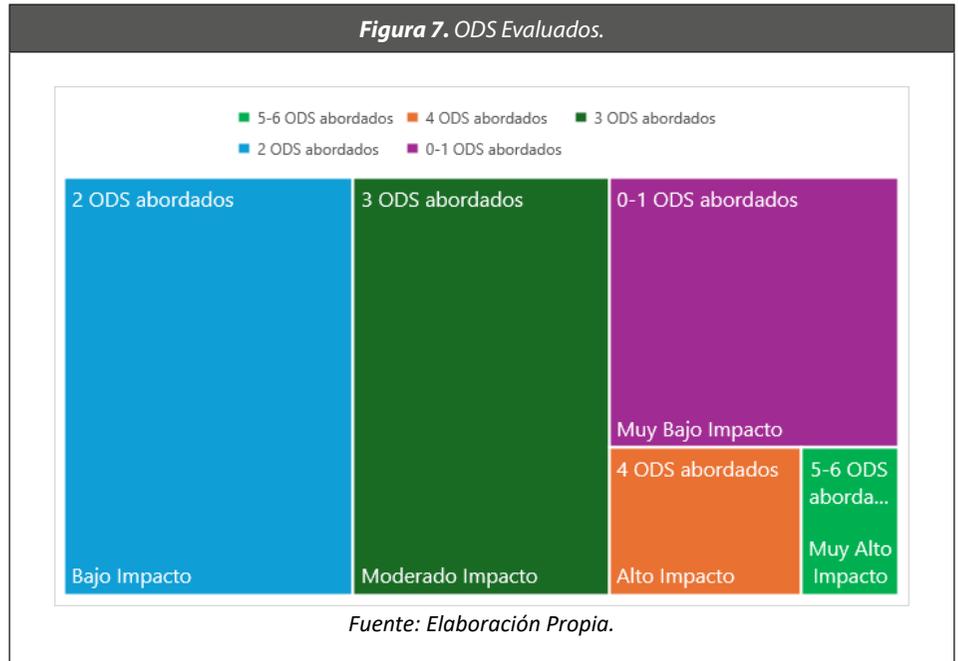
Durante la revisión se realizó un exhaustivo análisis de los estudios cuyo objetivo definido y resultados obtenidos formaran parte del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta parte de la revisión es clave para entender cómo se han alineado las investigaciones actuales en el contexto de las metas internacionales de sostenibilidad. Entre los ODS revisados destacan el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 13 (Acción por el clima), ODS 14 (Vida submarina) y ODS 17

(Alianzas para lograr los objetivos). La diversidad de estos objetivos revela la interrelación entre la gestión del agua y otro tipo de cuestiones asociadas con el desarrollo sostenible; al referirnos a este tipo de investigación es importante para ver la manera en la que debemos incorporar las tareas de investigación sobre agua en distintas políticas que promuevan la interrelación de estos objetivos. Los ODS no funcionan de forma aislada, sino que se encuentran interconectados, lo que implica que se puede favorecer el avance de alguno hasta influir positivamente en otros. En la Figura 7 se muestra el porcentaje de estudios que trataron entre uno y seis de los ODS analizados.

Los datos muestran que un 34,69% que las publicaciones académicas que utilizamos como referencia tienen un impacto reducido, ya que se centran en hasta dos ODS, lo que produce un cambio de alcance muy limitado. Al no abordar más de la mayoría de los ODS, los artículos carecen de un carácter multidimensional en su naturaleza que les permita generar un cambio en la gestión de los recursos hídricos, sobre todo en las áreas urbanas densamente pobladas o vulnerables.

Por otra parte, las publicaciones que asumen un impacto normal se representan mediante un 30,61% que abordan la consideración de tres ODS. Lo cual puede apuntar a que muchos estudios empiezan a asumir este tipo de investigación en el sentido de abarcar varias dimensiones del desarrollo sostenible y lo que se puede compendiar como las perspectivas de la sostenibilidad. Reconocer que es posible mejorar la forma en que se integran más ODS para generar soluciones más efectivas y adaptadas al contexto específico.

Los resultados también destacan que solamente un 8,16% y un 4,08% de las publicaciones revisadas tienen un impacto alto y muy alto, respectivamente, integrando más de cuatro ODS. Estas investigaciones, que tienen un enfoque holístico y multidimensional, son clave para entender la forma en la cual las interacciones de muchos ODS pueden aprovecharse para informar unos resultados más substanciales. Estos estudios se deben tomar como referencia para futuras investigaciones en el sentido de profundizar en la gestión de recursos hídricos para obtener ese impacto a raíz de la investigación científica.

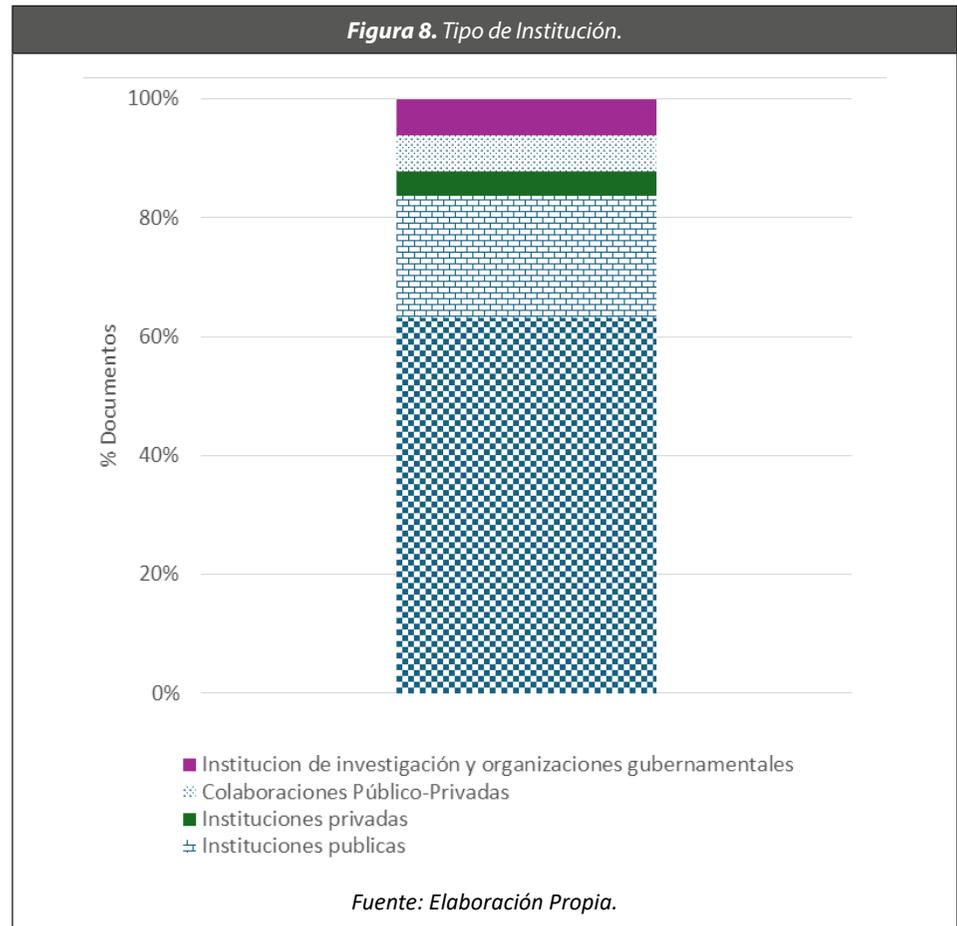


Para concluir, un 22,45% de los documentos reseñados se encuentran dentro de la categoría de “muy bajo impacto” porque abordan sólo un único ODS o no abordan ninguno. Lo que nos hace notar la necesidad de ampliar el marco de los estudios para potenciar el desarrollo de ODS, ya que al enfatizar en un solo ODS en concreto limita el potencial de los estudios de contribuir a una transformación sistémica de la sostenibilidad social o medioambiental. El potencial máximo y la sostenibilidad de las iniciativas requieren de estudios que se basen no sólo en los retos que presentan las unidades de análisis, sino que contemplen cómo las soluciones que encuentran estas iniciativas pueden contribuir a otros ODS, resolviendo así la problemática social, facilitando un mayor desarrollo y optimizando la gestión de recursos hídricos de forma sistemática.

#### *4.5 El papel de las instituciones públicas y privadas*

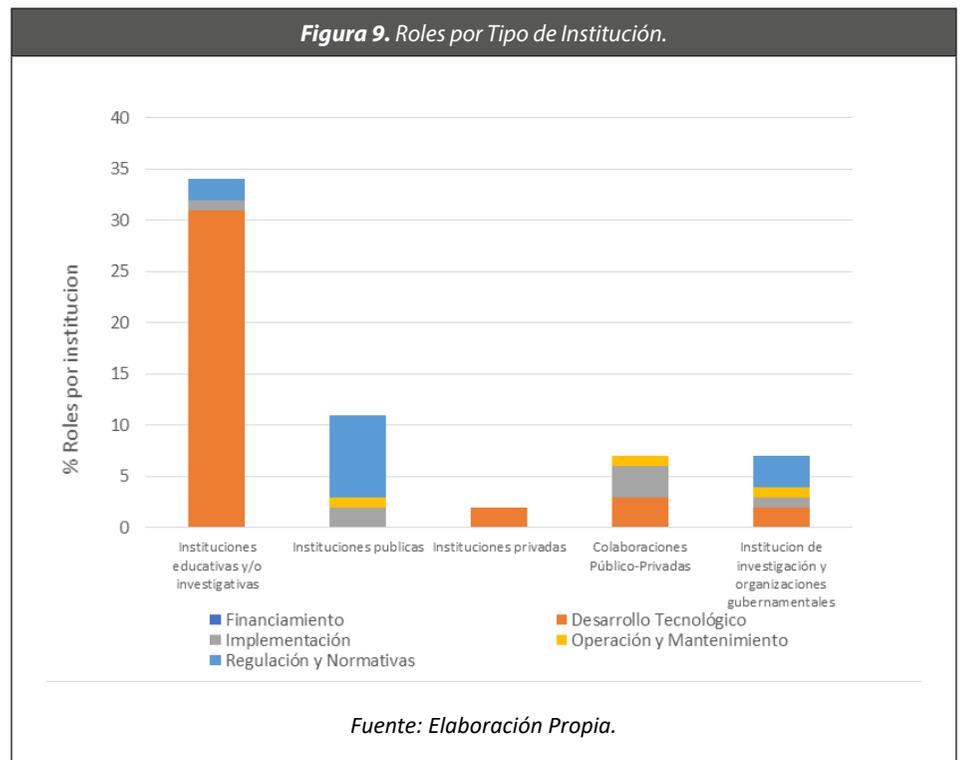
En el análisis de la distribución de roles asociados a la aparición de los tipos de instituciones en el marco de los estudios de agua digital se presenta una clara predominancia de las instituciones educativas e investigadoras. Las instituciones educativas e investigadoras presentan un porcentaje notable, un 63,3% del total de documentos, lo que subraya su importancia como fuente

de conocimiento y como vía para generar teorías, metodologías y prácticas que permiten anticipar los fenómenos relacionados con la gestión del agua, la calidad del agua y su impacto en el conjunto de la sociedad, tal como se ilustra en la Figura 8.



Este dato menciona la importancia de universidades (61,5%) y centros de investigación (14,0%) como protagonistas del conocimiento sobre la gestión hídrica; en otro rango, las instituciones públicas suponen el 20,4% de los documentos revisados, lo que refleja un compromiso significativo por parte de los gobiernos y, en consecuencia, de las entidades públicas. Las investigaciones revisadas sobre el agua tienen un énfasis particular en la creación y aplicación de políticas públicas fundamentadas en evidencia, con el fin de abordar los desafíos hídricos. Las instituciones privadas tienen una representación muy escasa (4,1%), revelando una menor implicación en la investigación

sobre gestión hídrica, lo cual puede estar motivado por diferentes prioridades, enfoques o recursos respecto a las instituciones públicas y académicas. Por otro lado, las colaboraciones público-privadas y las asociaciones entre las instituciones de investigación y las agencias gubernamentales muestran un 6,1% cada una, siendo estas necesarias para proponer la combinación de recursos y de especialistas provenientes de diferentes ámbitos para la resolución de problemas complejos, desde las perspectivas interdisciplinarias. La participación mixta de las instituciones de investigación y de las agencias gubernamentales muestra la importancia del nexo entre la ciencia y las políticas públicas, de donde surgen necesariamente resultados de beneficio o provecho para las comunidades locales y para la sociedad en su conjunto. Asimismo, el análisis señala oportunidades para aumentar la participación del sector privado y fortalecer las colaboraciones intersectoriales, lo que podría enriquecer la investigación con nuevas perspectivas y enfoques innovadores, contribuyendo no solo a una mejor gestión del agua, sino también impulsando el desarrollo sostenible.



El análisis de la distribución de roles entre distintos tipos de instituciones en los estudios sobre la gestión de los recursos hídricos, como se puede observar en la Figura 9, permite ver que la investigación y la educación tienen un papel predominante en el desarrollo tecnológico, con 31 artículos que enfatizan su carácter sobresaliente en la innovación y la creación de nuevas tecnologías. Por el contrario, las instituciones públicas o gubernamentales asumen el papel de principales responsables de la regulación o normativa, con 8 artículos, acentuando su funcionalidad en la creación de unos marcos de referencia que guían el desarrollo de tecnologías y políticas.

Las colaboraciones público-privadas emergen como actores relevantes de la ejecución de proyectos que se combinan entre sí y comparten recursos en función de maximizar el impacto; en el caso de la operación y el mantenimiento está menos documentada indicando posiblemente cierta distribución o el delegar responsabilidades en la ejecución de esta parte de la explotación. Finalmente, en el gráfico se pueden generar áreas como por ejemplo los financiamientos en donde las funciones no están bien definidas o son insuficientemente expuestas en los estudios que se han revisado, lo que podría señalar una oportunidad para futuras investigaciones que revelen los diferentes aportes que realizan los distintos tipos de instituciones en el financiamiento de proyectos sociales y tecnológicos.

## 5. Conclusiones

En conclusión, los resultados obtenidos definen que la integración de tecnologías digitales en la gestión del agua continúa con retos relevantes para conseguir un impacto alto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este estudio ha comprobado que, a pesar de que hay potencial, entre el 4% y el 8% de las iniciativas analizadas sólo demuestran una conexión importante con los ODS, lo cual expone la necesidad de empezar a desarrollar estrategias más efectivas y contextualizadas para lograr una conexión más alta y, en consecuencia, un mayor impacto.

Este tipo de hallazgos demuestran la relevancia de que los países tiendan a superar columnas estructurales importantes, tales como el acceso escaso al crédito, incluso en aquellos con una tecnología avanzada a nivel de infraestructura, como por ejemplo Brasil. Esto quiere decir que se tiene que dar prioridad al diseño de políticas públicas que prevean la mejora de aquellos aspectos sociales, políticos y económicos débiles que identificamos de esos países revisados en este estudio y se mejorará en el impulso de investigaciones exploratorias y aplicadas, lo cual permite potenciar el impacto de la digitación en la gestión del agua.

En comparación con resultados anteriores, esta revisión concluye que están en línea con la importancia que supone la digitalización en el campo de la gestión hídrica, como también que se establece una relación entre la influencia del contexto tecnológico y la capacidad para la implementación y adaptación de las tecnologías digitales. A diferencia de lo que sugieren investigaciones previas, el presente artículo revela las debilidades estructurales de ciertos países de la región y como están limitando su avance en términos de sostenibilidad.

Sin embargo, hay que subrayar que el presente estudio también cuenta con algunos límites, como la no recolección de datos e información a largo plazo para observar cómo ciertos fenómenos o comportamientos han sido influidos en el tiempo y, por otro lado, la no evaluación directa del comportamiento de los usuarios ante estas tecnologías. Aunque representa un avance, los resultados indican que la adopción generalizada de las tecnologías aún se encuentra en una etapa inicial y necesita un esfuerzo continuo para consolidarse.

Se recomienda que investigaciones futuras continúen con una metodología comparativa para evaluar el impacto de las tecnologías digitales en entornos climáticos y sociales distintos. Es necesario desarrollar más estudios que nos permitan encontrar modelos replicables y escalables para maximizar su efecto en las áreas vulnerables.

En conclusión, el estudio aquí presentado nos aproxima a comprender las oportunidades y también limitaciones que precisa la digitalización en la gestión del agua, destacando la necesidad de

fortalecer la colaboración entre sectores y, de esta forma, superar las barreras actuales para fomentar la sostenibilidad de las prácticas en la gestión del agua digital a gran escala.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada por su apoyo institucional, que facilitó la asesoría y acompañamiento necesarios para la realización de este artículo producto de un trabajo de grado. Este respaldo fue clave para el desarrollo y la exitosa culminación del estudio.

## 7. Referencias

- Abdel-Fattah, M. K.; Abd-Elmabod, S. K.; Aldosari, A. A.; Elrys, A. S.; Mohamed, E. S. (2020). Multivariate analysis to assess irrigation water quality: a case study of the Bahr Mouise canal, Eastern Nile Delta. *Water*, 12(9), 2537. <https://doi.org/10.3390/w12092537>
- Abdeljebbar, N.; Moussaid, L.; Medromi, H. (2019). Smart water management: Pillars and technologies. En: Y. Farhaoui & L. Moussaid (eds.), *ICBDSDE 2018: Proceedings of the International Conference on Big Data, Smart Cities and Digital Economy* (pp. 7-14). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12048-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12048-1_2)
- Alamoudi, A.; Abdallah, S.; Emad, M. (2023). Stormwater management modeling and machine learning for flash flood susceptibility prediction in Wadi Qows, Saudi Arabia. *Hydrological Research Letters*, 17(62). <https://doi.org/10.3178/hrl.17.62>
- Araújo de Brito, Y. M.; Rufino, A.; Braga, C. F. C.; Alexandra, I.; Mulligan, K. (2021). The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(31). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08839-5>
- Arias-Rodriguez, F. J.; Méndez-Sánchez, C.; Mendoza, I. (2020). Monitoring water quality of Valle de Bravo reservoir, Mexico, using entire lifespan of MERIS data and machine learning approaches. *Remote Sensing*, 12(10), 1586. <https://doi.org/10.3390/rs12101586>
- Ascensão, É. S.; Marinangelo, F. M.; Dias, E. M.; Almeida, C. F. M.; Kagan, N. (2023). Applications of Smart Water Management Systems: A literature review. *Water*, 15(19), 3492. <https://doi.org/10.3390/w15193492>

- Baptista, L.; Morais, R.; Oliveira, C. (2023). Rooftop water harvesting for managed aquifer recharge and flood mitigation in tropical cities: Towards a strategy of co-benefit evaluations in João Pessoa, northeast Brazil. *Journal of Environmental Management*, 323, 118034. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118034>
- Bonilla, C.; Brentan, B.; Montalvo, I.; Ayala-Cabrera, D.; Izquierdo, J. (2023). Digitalization of water distribution systems in small cities, a tool for verification and hydraulic analysis: A case study of Pamplona, Colombia. *Water*, 15(21), 3824. <https://doi.org/10.3390/w15213824>
- Bouhout, M.; Allam, S.; Abidi, A. (2024). Spatial variability of nitrate leaching and risk assessment of nitrate contamination in the Ghiss-Nekor alluvial aquifer system (Northeastern Morocco) through Disjunctive Kriging. *Science of the Total Environment*, 867, 02009. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e02009>
- Bouramdane, M.; Ayat-Allah, H. (2023). Optimal water management strategies: Paving the way for sustainability in smart cities. *Smart Cities*, 6(5), 2849–2882. <https://doi.org/10.3390/smartcities6050128>
- Caro-Camargo, C. A.; Bladé i Castellet, E.; Soler, D. G.; Hernández, J. D. (2023). Protocol to monitor water governance based on indicators for rural basins. *Ingeniería e Investigación*, 43(1), e90309. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.90309>
- Dantas, M. S.; de Oliveira, J. C.; Pinto, C. C.; Oliveira, S. C. (2020). Impact of fecal contamination on surface water quality in the São Francisco River watershed in Minas Gerais, Brazil. *Water and Health Journal*, 18(1), 48–56. <https://doi.org/10.2166/wh.2019.153>
- de Souza, T. C.; de Andrade, M. F.; Silva, P. (2021). The Brazilian surface freshwater framework in union-dominated rivers: Challenges and prospects for water quality management. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 39, 507–518. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200707>
- Eid, E. M.; Shaltout, K. H. (2017). Growth dynamics of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A modeling approach. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 28(1), 169–181. <https://doi.org/10.1007/s12210-016-0589-4>
- El-Rawy, M.; Haraz, O. M.; Morsy, M. A.; Saad, W. (2021). The role of smart technology to enhance date productivity and water efficiency in Middle Eastern and North African countries: A review of innovative sustainable solutions. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6, 67. <https://doi.org/10.1007/s41207-021-00274-3>
- Farreny, R.; Rieradevall, J.; Barbassa, A. P.; Teixeira, B.; Gabarrell, X. (2013). Indicators for the commercial management of urban water: The cases of commercial parks in Spain and Brazil. *Urban Water Journal*, 10(4). <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.716855>

- Finkler, N. R.; Cocconi, J.; Bortolin, T. A.; Mendes, L. A.; Schneider, V. E. (2018). Water quality monitoring in urban basins as support for water resources management: A case study from southern Brazil. *International Journal of Environmental Impacts*, 1(3), 298–311. <https://doi.org/10.2495/EI-V1-N3-298-311>
- Fouzi, T. A.; Youness, M.; Bouchra, L.; Ali, B. (2020). Spatio-temporal typology of the physico-chemical parameters of a large North African river: The Moulouya and its main tributaries (Morocco). *African Journal of Aquatic Science*, 45(4), 431–441. <https://doi.org/10.2989/16085914.2020.1727832>
- Furtado, S.; Lima, L.; Silveira, R. (2021). Evaluation of reduction of external load of total phosphorus and total suspended solids for rehabilitation of urban lakes. *Journal of Environmental Management*, 113339. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113339>
- Gonçalves, A. F.; Silva, M.; Pereira, A. (2020). An IoT-based framework for smart water supply systems management. *Future Internet*, 12(7), 114. <https://doi.org/10.3390/fi12070114>
- Guermazi, E.; Milano, M.; Reynard, E.; Zairi, M. (2019). Impact of climate change and anthropogenic pressure on groundwater resources in arid environments. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(1), 73–92. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9797-9>
- Hamad, S. M.; Ahweejb, Y. A. (2020). Evaluation of the Nubian Sandstone Aquifer System (NSAS) in Al Kufra Oasis, Southeast Libya. *Desalination and Water Treatment*, 177, 306–316. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25503>
- Hemdan, E. E.-D.; Essa, Y. M.; Shouman, M.; El-Sayed, A.; Moustafa, A. N. (2023). An efficient IoT based smart water quality monitoring system. *Multimedia Tools and Applications*, 82(28), 28827–28851. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14504-z>
- Hu, T.; Mallick, K.; Hulley, G. C.; Perez Planells, L.; Gottsche, F. M.; Schlerf, M.; Hitzelberger, P.; Didry, Y.; Szantoi, Z.; Alonso, I.; Sobrino, J. A.; Skoković, D.; Roujean, J.-L.; Boulet, G.; Gamet, P.; Hook, S. (2022). Continental-scale evaluation of three ECOSTRESS land surface temperature products over Europe and Africa: Temperature-based validation and cross-satellite comparison. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113296. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113296>
- Jurado Zavaleta, M. A.; Alcaraz, M. R.; Penaloza, L. G.; Boemo, A.; Cardozo, A.; Tarcaya, G.; Azcarate, S. M.; Goicoechea, H. C. (2021). Chemometric modeling for spatiotemporal characterization and self-depuration monitoring of surface water assessing the pollution sources impact of northern Argentina rivers. *Microchemical Journal*, 162, 105841. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105841>

- Kessasra, M.; Kheira, H.; Mustapha, A. (2017). Combined hydrogeological and nitrate modelling to manage water resources of the Middle Soummam Aquifer, Northeast of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(12), 255. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3160-4>
- Leta, M. K.; Demissie, T. A.; Tränckner, J. (2021). Hydrological responses of the watershed to historical and future land use cover change dynamics in the Nashe watershed, Ethiopia. *Water*, 13(17), 2372. <https://doi.org/10.3390/w13172372>
- Lima, M. L.; Romanelli, A.; Calderon, G.; Massone, H. E. (2019). Multi-criteria decision model for assessing groundwater pollution risk in the urban-rural interface of Mar del Plata City (Argentina). *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 347. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7485-1>
- Madonsela, B.; Koop, S.; van Leeuwen, K.; Carden, K. (2019). Evaluation of water governance processes required to transition towards water sensitive urban design—An indicator assessment approach for the city of Cape Town. *Water*, 11(2), 292. <https://doi.org/10.3390/w11020292>
- Marín Celestino, A. E.; Ramos Leal, J. A.; Martínez Cruz, D. A.; Tuxpan Vargas, J.; De Lara Bashulto, J.; Morán Ramírez, J. (2019). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality, using multivariate statistical approaches and water quality index in a wastewater irrigated region. *Water*, 11(8), 1702. <https://doi.org/10.3390/w11081702>
- Mateus, C.; Guerrero, C. A.; Quezada, G.; Lara, D.; Ochoa-Herrera, V. (2019). An integrated approach for evaluating water quality between 2007–2015 in Santa Cruz Island in the Galapagos Archipelago. *Water*, 11(5), 937. <https://doi.org/10.3390/w11050937>
- Mazari-Hiriart, M.; Arceo, S. (2019). Challenges and opportunities on urban water quality in Mexico City. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 169. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00169>
- Mendoza-Espinosa, L. G.; Daesslé, L. W. (2018). Consolidating the use of reclaimed water for irrigation and infiltration in a semi-arid agricultural valley in Mexico: Water management experiences and results. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 8(2), 211–222. <https://doi.org/10.2166/washdev.2018.021>
- Mendoza-Gomez, M.; Quintana, J.; Garzon, A. (2022). Water Supply Management Index: León, Guanajuato, Mexico. *Water*, 14(6), 919. <https://doi.org/10.3390/w14060919>
- Mezni, H.; Driss, M.; Boulila, W.; Ben Atitallah, S.; Sellami, M.; Alharbi, N. (2022). SmartWater: A service-oriented and sensor cloud-based framework for smart monitoring of water environments. *Remote Sensing*, 14(4), 922. <https://doi.org/10.3390/rs14040922>

- More, S. J.; Patil, S. G.; Talawadekar, P.; Chitnis, R.; Kondle, M. R. (2023). Intelligent mine water management tools—eMetsi and machine learning GUI. *Mine Water and the Environment*, 42(2), 345–356. <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00917-7>
- Nunes, G.; Minoti, R. T.; Koide, S. (2020). Mathematical modeling of watersheds as a subsidy for determining the water balance of reservoirs: The case of Lake Paranoá, Federal District, Brazil. *Hydrology*, 7(4), 85. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040085>
- Oertlé, E.; Mueller, S. R.; Choukr-Allah, R.; Jaouani, A. (2020). Decision support tool for water recovery beyond technical considerations: Case studies from Egypt, Morocco, and Tunisia. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(1), 46–56. <https://doi.org/10.1002/ieam.4303>
- Passos, J. B. C.; Campos, J. A.; Teixeira, D. B. S.; Lima, R. P. C.; Silva, D. D.; Fernandes-Filho, E. I. (2021). Multivariate statistics for spatial and seasonal quality assessment of water in the Doce River basin, Southeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(125). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08918-1>
- Pereao, D.; Gonzalez, F.; Rojas, E. (2021). Effects of municipal wastewater treatment plant effluent quality on aquatic ecosystem organisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 56(14), 1435–1446. <https://doi.org/10.1080/10934529.2021.2009730>
- Silva, C. O. F.; Manzione, R. L.; Albuquerque Filho, J. L. (2018). Large-scale spatial modeling of crop coefficient and biomass production in agroecosystems in Southeast Brazil. *Horticulturae*, 4(44). <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040044>
- Silva, T. F. G.; Beltrán, D.; Nascimento, N. O.; Rodríguez, J. P.; Mancipe-Muñoz, N. (2023). Assessing major drivers of runoff water quality using principal component analysis: A case study from a Colombian and a Brazilian catchments. *Urban Water Journal*, 20(10), 1555–1567. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2029913>
- Siqueira, R. C.; Moura, P. M.; Silva, T. F. G. (2019). Methodology for the construction of an urban flood hazard chart. *SciELO Brasil*. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180125>
- Souza, F. P.; Costa, M. E. L.; Koide, S. (2019). Hydrological modeling and assessment of detention ponds to improve urban drainage systems and water quality. *Water*, 11(8), 1547. <https://doi.org/10.3390/w11081547>
- Teixeira, L.; Sanches, F.; Gomes, R. (2016). Relationship between turbidity and suspended sediment concentration from a small hydrographic basin in Santa Maria (Rio Grande do Sul, Brazil). *International Journal of River Basin Management*, 14(4), 341–349. <https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1198911>

- Temesgen, T. (2023). Water scarcity management system and challenges in the water-scarce area of the Haramaya watershed, Eastern Ethiopia. *Water Resources and Irrigation Management*, 12(1-3), 54-63. <https://doi.org/10.19149/wrim.v12i1-3.3143>
- The World Bank Group. (2020). *Doing Business: Measuring business regulations*. Recuperado de <https://www.doingbusiness.org/en/rankings>
- Transparency International. (2020). *Corruption Perceptions Index 2020*. Recuperado de <https://www.transparency.org>
- Tsuji, T. M.; Costa, M. E. L.; Koide, S. (2019). Monitoring and modeling diffuse pollution in small urban watersheds of Brazil's Cerrado. *Water Science & Technology*, 79(10), 1912-1922. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.190>
- UNESCO Institute for Statistics. (2022). *Gross domestic expenditure on R&D (GERD) as a percentage of GDP*. Recuperado de <http://uis.unesco.org>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2020). *Human Development Report 2020*. Recuperado de <http://hdr.undp.org>
- Valenzuela-Morales, F.; Alvarado, R.; González, M. (2023). Climatic and socioeconomic regionalization of the meteorological drought in Mexico using a predictive algorithm. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05908-z>
- Verma, A.; Chaurasia, D.; Singh, S. (2019). Security and privacy in smart city applications and services: Opportunities and challenges. En *Smart Cities: Issues and Challenges* (pp. 3-20). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16837-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16837-7_1)
- World Bank. (2020). *Renewable internal freshwater resources per capita (cubic meters)*. Recuperado de <https://data.worldbank.org>
- World Economic Forum. (2020). *Global Competitiveness Report 2020*. Recuperado de <https://www.weforum.org/reports>
- Yale Center for Environmental Law & Policy. (2020). *2020 Environmental Performance Index*. Recuperado de <https://epi.yale.edu>