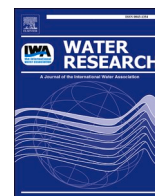


Listas de contenidos disponibles en [Ciencia directa](#)

Investigación del agua

Página de inicio de la revista: www.elsevier.com/locate/watres

Revisar

Lograr una gestión más inteligente de las aguas pluviales: una revisión de los obstáculos y una hoja de ruta para su aplicación en el mundo real

Chris Sweetapple^{a,*}, James Webber^a, Anna Hastings^b, Peter Melville-Shreeve^a^aCentro de Sistemas Hídricos, Facultad de Ingeniería, Matemáticas y Ciencias Físicas, Universidad de Exeter, North Park Road, Exeter, Devon EX4 4QF, Reino Unido^bConsejo del Condado de East Sussex, Ayuntamiento, St Anne's Crescent, Lewes, East Sussex, BN7 1UE, Reino Unido

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave:

Internet de las cosas (IoT)
Control en tiempo real (RTC)
Inteligente
Aguas pluviales
Transición

ABSTRACTO

La gestión eficaz de los sistemas de aguas pluviales es necesaria para la protección tanto del entorno construido como del natural. Sin embargo, la gestión de aguas pluviales se enfrenta a múltiples y crecientes desafíos, como el cambio climático, el envejecimiento de las infraestructuras, el crecimiento demográfico, la urbanización, las preocupaciones ambientales, los cambios regulatorios e institucionales y la concienciación pública. Si bien el potencial de los sistemas de gestión de aguas pluviales inteligentes, basados en el internet de las cosas, para abordar estos desafíos es cada vez más reconocido, y existe considerable evidencia en la literatura que respalda los beneficios de los enfoques basados en datos, su implementación hasta la fecha sigue siendo escasa. Por lo tanto, este documento ofrece una revisión exhaustiva de las posibles barreras para la adopción de prácticas de gestión de aguas pluviales más inteligentes que deben abordarse, y proporciona una hoja de ruta para su aplicación en el mundo real.

Se identifican las barreras relacionadas con todos los elementos de la gestión de aguas pluviales, desde la detección de activos hasta el análisis de datos y la optimización en línea. Los desafíos técnicos que se analizan incluyen la disponibilidad y fiabilidad de las tecnologías, las limitaciones tecnológicas y físicas, la toma de decisiones, la incertidumbre y la seguridad. Las barreras técnicas se están reduciendo rápidamente y existe una creciente evidencia en la literatura académica sobre la eficacia de las tecnologías inteligentes. Sin embargo, las barreras socioeconómicas siguen siendo un desafío importante, y se analizan cuestiones como la confianza y la desconfianza, la resistencia al cambio, el coste y la falta de conocimiento y orientación.

También se presenta una "rueda de gestión inteligente de aguas pluviales" que ofrece un enfoque flexible e iterativo para la implementación de funcionalidades inteligentes. A modo de hoja de ruta, esta herramienta busca facilitar una metodología estructurada para superar obstáculos y evaluar el progreso, y puede utilizarse para explorar las ventajas y desventajas y las relaciones entre los diferentes niveles de implementación de cada una de las tecnologías que componen un sistema inteligente de aguas pluviales.

1. Introducción

1.1. La necesidad del cambio

Los "sistemas de aguas pluviales" pueden referirse a la infraestructura física, digital y organizacional utilizada para recolectar, transportar, tratar y gestionar la escorrentía pluvial (Butler y otros, 2018). La definición del alcance de este "sistema" puede incluir una amplia gama de componentes diversos, especialmente cuando se consideran las infraestructuras organizativas y codependientes. En este documento, nos centramos en los componentes físicos (es decir, tuberías, almacenamiento, sensores) y digitales (software) de este sistema, con una discusión limitada de la infraestructura organizativa, ya que esta se relaciona directamente con el funcionamiento de los componentes mencionados anteriormente. El documento analiza elementos como el almacenamiento y el transporte en términos generales, pero

Para esta función se podrían aplicar tanto soluciones convencionales como ecológicas.

La gestión eficaz de los sistemas de aguas pluviales es necesaria para proteger tanto el entorno construido como el natural. Sin embargo, la gestión de las aguas pluviales se enfrenta a múltiples y crecientes desafíos.

En primer lugar, los sistemas de aguas pluviales existentes se han diseñado basándose en datos históricos de precipitaciones; sin embargo, hay cada vez más evidencia de que los patrones de precipitaciones están cambiando con el cambio climático y muchos lugares están sujetos a tormentas más frecuentes e intensas (Mallakpour y Villarini, 2017). En consecuencia, los sistemas de aguas pluviales están cada vez más expuestos a eventos que exceden sus capacidades de diseño, lo que resulta en una creciente frecuencia y gravedad de inundaciones (Whitfield, 2012). Además, estos desafíos pueden agravarse en las zonas costeras, donde la funcionalidad de los sistemas de aguas pluviales impulsados por la gravedad también se está reduciendo por el aumento del nivel del mar (Sadler y otros, 2020) y aumentó

* Autor correspondiente.

Dirección de correo electrónico: C.Sweetapple@ex.ac.uk (C. Sweetapple).<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120505>

Recibido el 7 de diciembre de 2022; Recibido en forma revisada el 1 de julio de 2023; Aceptado el 18 de agosto de 2023.

Disponible en línea el 19 de agosto de 2023.

0043-1354/© 2023 Los autores. Publicado por Elsevier Ltd. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

bloqueo de mareas.

En segundo lugar, el crecimiento demográfico, la rápida urbanización y el cambio de uso del suelo están imponiendo presiones adicionales (Browne y otros, 2021). La urbanización, por ejemplo, suele aumentar las zonas impermeables, lo que a su vez incrementa la escorrentía. En términos más generales, la expansión de las zonas urbanas altera los procesos naturales, influyendo en la infiltración y la evapotranspiración y dificultando la comprensión de su dinámica (McGrane, 2016). También puede tener implicaciones de calidad, ya que factores a escala de cuenca, como el diseño del suelo urbano, también influyen en los efectos de las aguas pluviales sobre la eutrofización en los cuerpos de agua aguas abajo (Taylor y otros, 2004).

Un aumento de contaminantes en las escorrentías de aguas pluviales plantea desafíos adicionales (Kerkez y otros, 2016; Naughton y otros, 2021), y se reconoce en particular el impacto del desarrollo en las cargas de nitrógeno y fósforo (por ejemplo, Agencia de Medio Ambiente, 2019; Inglaterra natural, 2022). También existe una creciente comprensión de la importancia de los contaminantes emergentes, como los microplásticos, los productos farmacéuticos, los agroquímicos, los metales y los contaminantes orgánicos persistentes (Webber y otros, 2021). Estos pueden ser problemáticos ya que la primera escorrentía que ingresa a los estanques de retención controlados pasivamente cuando está seca, por ejemplo, tiene un tiempo de residencia muy corto, lo que puede tener consecuencias negativas debido a su alta carga contaminante (Gaborit y otros, 2013).

También existe una creciente conciencia pública y demanda de abordar problemas asociados, como los desbordamientos de alcantarillado combinado (CSO). La evolución de las regulaciones (por ejemplo, los nuevos requisitos de control de escorrentías para los permisos del Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes en EE. UU.) impone presiones adicionales (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2023)), y los planes gubernamentales están empezando a abordar los desafíos de las aguas pluviales (por ejemplo, el documento de política 'Plan de reducción de descargas por desbordamientos de tormentas' elaborado por Departamento de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Asuntos Rurales (2022) Establece nuevos objetivos para las compañías de agua del Reino Unido).

La necesidad de preservar los ecosistemas aguas abajo es otro factor impulsor del cambio, ya que se reconoce que las aguas pluviales son una fuente importante de degradación de la calidad en los cuerpos de agua receptores (Jefferson y otros, 2017) y los contaminantes en la escorrentía pueden amenazar la salud de los ecosistemas río abajo (como lo demuestran, por ejemplo, las floraciones de algas nocivas) (Mullapudi y otros, 2017). Esto a su vez puede resultar en una pérdida de hábitats (Muschalla y otros, 2014), fuentes de agua potable inseguras, pesca deteriorada y daños a sitios recreativos (Kerkez y otros, 2016). También se reconoce que las estructuras diseñadas con exceso de capacidad pueden transportar agua demasiado rápido y aumentar los volúmenes de escorrentía, la erosión de los arroyos y la invasión de las llanuras de inundación (Kerkez y otros, 2016), y que existe la posibilidad de que sistemas de transporte sobrediseñados en realidad causen daños a las propiedades y los ecosistemas río abajo, en lugar de prevenirlos, lo que hace necesarias una mayor remediación (Mullapudi y otros, 2018).

El envejecimiento de la infraestructura y las limitaciones del diseño y las prácticas operativas actuales proporcionan un impulso adicional al cambio (Mullapudi y otros, 2017), por ejemplo, destacó que la infraestructura envejecida tiene dificultades para seguir el ritmo del clima dinámico y cambiante, y Naughton y otros (2021) que podría no tener suficiente capacidad de adaptación para abordar adecuadamente las nuevas demandas que se le imponen. Además, si bien el aumento de la escorrentía pluvial suele abordarse mediante la expansión o el aumento del tamaño de la infraestructura gris (Kerkez y otros, 2016; Rosenberg y otros, 2010), las soluciones tradicionales y de ingeniería compleja para aumentar la capacidad de los sistemas de aguas pluviales proporcionan una solución estática y subóptima a un problema dinámico y en evolución y, por lo tanto, son desfavorables (Rimer y otros, 2019; Shishegar y otros, 2019). Los estanques de detención con control estático, por ejemplo, están diseñados para tormentas fuertes y prácticamente no ofrecen retención en eventos con un período de retorno bajo debido al gran diámetro de la tubería de salida. Los sistemas pasivos también contienen estructuras sobredimensionadas para muchas situaciones, ya que no pueden adaptarse a un evento y pueden requerir una inversión de capital mayor de la necesaria (Xu y otros, 2021). La construcción de infraestructura a gran escala también puede resultar indeseable o poco práctica, o tener costos prohibitivos.

Por último, otro desafío lo plantea la falta de conocimiento en tiempo real del estado del sistema y de las condiciones antecedentes y la necesidad de desarrollar modelos de control adaptativo en tiempo real (Eggimann y otros, 2017) teniendo

describió la gestión del riesgo de inundaciones como «un proceso de toma de decisiones en condiciones de incertidumbre». La modelización es un desafío debido a las complejidades del ciclo hidrológico urbano (Mullapudi y otros, 2017), y se requiere un mayor suministro de datos para mejorar la calibración y validación de los modelos. La falta de acceso remoto a datos o de monitoreo del sistema también requiere visitas periódicas para inspecciones rutinarias y mantenimiento reactivo, y puede resultar en gastos operativos evitablemente elevados (Xu y otros, 2021). Cuando ya existe seguimiento, este puede ser realizado por una variedad de agencias diferentes y solo puede accederse a él desde distintas fuentes (si es que es accesible).

1.2. El papel de una gestión más inteligente de las aguas pluviales

Se necesitan enfoques nuevos e innovadores que permitan gestionar las aguas pluviales de forma dinámica para abordar los desafíos antes mencionados, y cada vez se reconoce más el potencial de los sistemas de gestión de aguas pluviales "inteligentes" basados en Internet de las cosas (IoT) (por ejemplo, Bartos y otros, 2018; Xu y otros, 2021). Estos sistemas transformadores amplían, en lugar de reemplazar, la infraestructura verde y gris existente, mediante el uso de sensores y tecnología de la información para proporcionar conectividad e inteligencia integradas (Kerkez y otros, 2016). Ofrecen un amplio suministro de datos accesibles remotamente y en tiempo real, y brindan oportunidades para un control mejorado y automatizado. Puede encontrar más información sobre la definición y la funcionalidad de la «gestión inteligente de aguas pluviales» en Webber y otros (2022), y sus componentes clave se describen en Sección 2.1.

Existe evidencia considerable en la literatura sobre los importantes beneficios potenciales de enfoques de gestión del agua urbana más basados en datos, como el control en tiempo real (RTC) (Eggimann y otros, 2017). También se reconoce ampliamente que se deben implementar medidas adaptativas en los sistemas existentes (Bilodeau y otros, 2018) y las tecnologías de IoT permitirán que la infraestructura de aguas pluviales se vuelva altamente adaptable frente a las condiciones cambiantes (Kerkez y otros, 2016). Más específicamente, la integración de sensores, actuadores, pronósticos meteorológicos y pronósticos basados en modelos permite gestionar la escorrentía de aguas pluviales de forma proactiva y adaptativa (Naughton y otros, 2021) – donde la infraestructura anteriormente actuaba de manera pasiva e independiente, los sistemas inteligentes pueden brindar la capacidad de controlar las liberaciones con precisión desde los componentes de almacenamiento distribuidos (Ewing y Demir, 2021).

Si bien es imposible garantizar que un sistema funcionará según lo diseñado y en ocasiones se verá obligado a superar sus capacidades, la detección y el control en tiempo real pueden ayudar a permitir la adaptación a estas incertidumbres (Mullapudi y otros, 2017). El conocimiento de los estados hidrológicos y las predicciones de precipitaciones proporcionadas en tiempo real se pueden utilizar, por ejemplo, para determinar cómo modular las tasas de salida de la infraestructura de gestión de aguas pluviales (Shishegar y otros, 2019), y mientras que los sistemas convencionales de aguas pluviales con control pasivo se diseñan en base a datos históricos y con capacidades para adaptarse a los eventos de diseño, el monitoreo y control activo en tiempo real permite anticipar un peligro de inundación y adaptar el sistema para crear almacenamiento para cada evento (Xu y otros, 2021). Esto puede minimizar la necesidad de nuevas construcciones y, por lo tanto, ofrecer una solución con menores emisiones de carbono. Los sistemas inteligentes de aguas pluviales también pueden utilizarse para maximizar la eliminación de contaminantes y permitir beneficios a escala de cuencas hidrográficas (Mullapudi y otros, 2017).

A medida que los sensores de bajo costo, los microcontroladores y las tecnologías de comunicación inalámbrica se vuelven cada vez más accesibles, ahora existe un alcance creciente para modernizar los sistemas de aguas pluviales existentes con tecnologías de IoT para brindar intervenciones de control de aguas pluviales versátiles, económicas y totalmente automatizadas (Rimer y otros, 2019). Si bien antes el costo de los sensores de radar era prohibitivamente alto, por ejemplo, Southern Water recientemente completó la instalación de 22.000 para monitorear los flujos en su red de alcantarillado y permitir una gestión mejorada y proactiva (Agua del Sur, 2023). Los sistemas basados en IoT también se pueden escalar fácilmente y pueden modernizarse con poca configuración (Singh y Ahmed, 2021), por lo que equipar los sistemas de aguas pluviales existentes con sensores y controladores de bajo costo ofrece una oportunidad sin precedentes para

Mejorar el caudal y la calidad del agua urbana (Kerkez y otros, 2016).

1.3. Implementación hasta la fecha

El uso de tecnologías de IoT a nivel mundial está aumentando rápidamente en muchos sectores, incluidos particularmente el de energía y comunicaciones (Webber y otros, 2022), y se están realizando importantes inversiones en tecnologías y redes de transmisión de datos (Eggimann y otros, 2017).

En el sector hídrico, en particular, las tecnologías de IoT se han implementado con diversos fines. Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se han utilizado ampliamente históricamente en instalaciones centralizadas, como plantas de tratamiento de agua y aguas residuales, y ahora también cubren ubicaciones críticas como los aliviaderos de aguas residuales en los sistemas de drenaje urbano y las entradas a las zonas de medición urbana en las redes de distribución de agua (Oberascher y otros, 2022). Otras aplicaciones incluyen la monitorización de la calidad del agua y la detección de fugas en sistemas de distribución de agua, y la optimización del uso del agua para riego basándose en datos ambientales (Radhakrishnan y Wu, 2018) y la gestión del abastecimiento de agua (Yasin y otros, 2021). El RTC también se ha estudiado ampliamente en el tratamiento de agua y aguas residuales (Kerkez y otros, 2016), y se ha utilizado durante décadas para controlar los flujos del sistema de alcantarillado combinado (Naughton y otros, 2021).

Sin embargo, la implementación en sistemas de aguas pluviales aún está en sus inicios, y el sector ha tardado en adoptar tecnologías de IoT (Kerkez y otros, 2016). Eggimann y otros (2017) sugieren que la mayoría de los servicios públicos aún carecen de datos suficientes para las aplicaciones de gestión del agua urbana, y que la gestión integrada de todo el sistema todavía sólo se aplica ocasionalmente (Oberascher y otros, 2022).

Hay señales de progreso: cada vez se están implementando más redes de sensores para monitorear las inundaciones (Ewing y Demir, 2021), por ejemplo, y se están empezando a utilizar sensores para estudiar el rendimiento de instalaciones individuales de aguas pluviales (por ejemplo, Barraud y otros, 2002; Barthelemy y otros, 2020; Kerkez y otros, 2016) y hay un movimiento hacia un mayor monitoreo de los sistemas de alcantarillado (Anglian Water, 2021; Agua del Sur, 2023). Si bien los sensores y el monitoreo por sí solos no brindan una funcionalidad inteligente, son un componente crítico e ilustran el progreso hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales.

También hay un creciente cuerpo de investigación que apoya el uso de sistemas inteligentes de aguas pluviales con monitoreo remoto y RTC (por ejemplo, Bilodeau y otros, 2018; Mullapudi y otros, 2017; Persaud y otros, 2019), y varios proyectos actuales en el Reino Unido en el marco del 'Programa de Innovación en Resiliencia Costera y ante Inundaciones' tienen como objetivo mejorar la evidencia sobre los costos y beneficios de las tecnologías inteligentes (Agencia de Medio Ambiente, 2022). Sin embargo, a pesar del claro potencial de dichos sistemas para mejorar la gestión de las aguas pluviales, las tecnologías de IoT aún no han logrado una adopción generalizada (Naughton y otros, 2021; Webber y otros, 2022) y existe un margen significativo para una mayor implantación.

1.4. Objetivos del trabajo

Dada la baja adopción actual de tecnologías de IoT en los sistemas de aguas pluviales, este documento tiene como objetivo identificar las posibles barreras para la adopción de prácticas de gestión de aguas pluviales más inteligentes, incluidos los posibles desafíos y riesgos, y proporcionar una hoja de ruta para su aplicación en el mundo real.

Para lograr este objetivo, se exploran sistemáticamente las barreras, identificando los problemas relacionados con cada una de las diferentes tecnologías y capacidades que contribuyen a las funcionalidades "inteligentes" de los sistemas de gestión de aguas pluviales, así como cualquier desafío más amplio. Esto utiliza el marco de Webber y otros (2022) Proporcionar la base para un análisis lógico y estructurado de las barreras y los riesgos asociados con cada elemento de la gestión inteligente de las aguas pluviales.

Tras el análisis de las posibles barreras, se presenta una "rueda de gestión inteligente de aguas pluviales", que sienta las bases de una hoja de ruta para la transición hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales en aplicaciones prácticas. Esto permite identificar oportunidades para superar las barreras y facilita un enfoque iterativo paso a paso.

Se espera que, al identificar las posibles barreras para la

Mediante la implementación de sistemas de gestión de aguas pluviales más inteligentes y el suministro de una hoja de ruta que pueda utilizarse para superarlos, se podrán abordar más fácilmente en el futuro y se podrán aprovechar más ampliamente los beneficios potenciales que ofrecen estos sistemas.

2. Barreras para la implementación

2.1. Marco de análisis

Se analizan las barreras en relación con los elementos del marco de aguas pluviales inteligentes presentado por Webber y otros (2022) (mostrado en Figura 1). Este marco identifica las diferentes tecnologías necesarias para proporcionar niveles crecientes de funcionalidad inteligente y destaca las capacidades de control y operación que ofrece cada incremento en la provisión de tecnología. En resumen: La existencia de solo los activos de aguas pluviales permite únicamente la operación pasiva; la incorporación de sensores en los activos permite la operación activa; si se recopilan los datos de los sensores, se puede aplicar la optimización fuera de línea; la comunicación y la gestión de los datos pueden permitir el control en línea, tanto a nivel de activo como de red; y la provisión de análisis de datos e integración de datos externos permite la optimización en línea.

2.2. Barreras

Las barreras para la implementación de sistemas de gestión de aguas pluviales más inteligentes se pueden clasificar como técnicas o socioeconómicas (Webber y otros, 2022; Xu y otros, 2021). Además, las diferentes tecnologías y estrategias operativas involucradas en la gestión inteligente de aguas pluviales plantearán diferentes desafíos. Por lo tanto, esta sección aborda primero las barreras técnicas y las relaciona con la tecnología o la capacidad de control y operativa en Figura 1 con las que se relacionan para facilitar la identificación de los pasos para superarlas y el orden en que deben abordarse. Las barreras socioeconómicas no son (necesariamente) específicas de ninguna de las tecnologías involucradas y, por lo tanto, se abordan por separado.

2.2.1. Técnico

En este documento se proporciona un resumen de las posibles barreras técnicas para la implementación de una gestión más inteligente de las aguas pluviales (y los desafíos y riesgos asociados). Tabla 1, con un análisis más detallado de cada categoría a continuación. Para cada barrera, se identifican los elementos del marco directamente asociados. Una barrera para una tecnología también representará una barrera indirecta para la implementación de todas las tecnologías posteriores que dependan de este elemento (por ejemplo, una barrera para la comunicación de datos será una barrera indirecta para la gestión, el análisis y la integración de datos); sin embargo, para mayor claridad, estas dependencias no se incluyen en Tabla 1 Cuando corresponda, se incluyen las relaciones directas entre una barrera, la tecnología que impacta y la capacidad inmediata afectada en la identificación de los elementos relevantes del marco (por ejemplo, una barrera para la detección de activos también puede representar una barrera para la operación activa). Los elementos de "activo" y "operación pasiva" del marco no se consideran, ya que representan la tecnología y la operación de referencia del sistema de aguas pluviales (es decir, antes de la implementación de funcionalidades inteligentes) y, por lo tanto, no representan barreras para la transición a una gestión más inteligente.

2.2.1.1. Disponibilidad y confiabilidad de las tecnologías. Muchas de las tecnologías necesarias para los sistemas inteligentes de aguas pluviales, incluidos sensores, actuadores y tecnologías de comunicación, están disponibles y son fiables, y ya son omnipresentes en otros sectores como la energía, el transporte y las comunicaciones (Webber y otros, 2022). Esto incluye, por ejemplo, sensores que permiten medir la cantidad de aguas pluviales (incluidos niveles y caudales). Sin embargo, persisten varios desafíos potenciales relacionados con la disponibilidad y fiabilidad de las tecnologías.

En primer lugar, si bien muchas de las tecnologías subyacentes existen y están

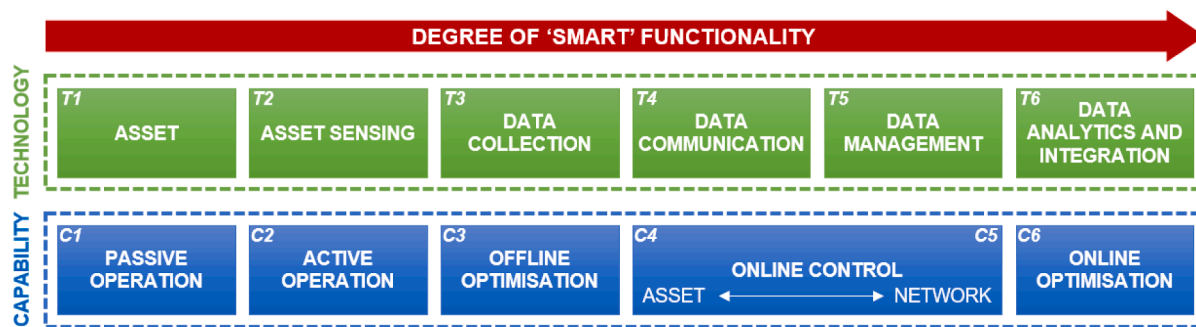


Figura 1. Marco de gestión inteligente de aguas pluviales (Webber y otros, 2022).

Tabla 1

Resumen de las barreras técnicas, los desafíos y los riesgos asociados con la implementación de una gestión más inteligente de las aguas pluviales, con identificación de los elementos del marco correspondientes (consulte Figura 1 para la interpretación de los códigos de los elementos).

Barrera, desafío o riesgo	Elementos relevantes del marco*									
	T2	T3	T4	T5	T6	C2	C3	C4	C5	C6
Disponibilidad y fiabilidad de las tecnologías: 1.										
Tecnologías de sensores	incógnita					incógnita				
2. Tecnologías de recopilación y comunicación de datos		incógnita	incógnita				incógnita	incógnita		
3. Disposición sobre gestión de datos				incógnita					incógnita	
4. Modelos para la toma de decisiones y el control					incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
5. Ausencia de soluciones integrales	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
Limitaciones tecnológicas y físicas:										
1. Dependencias y limitaciones de la infraestructura heredada	incógnita				incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
2. Facilidad de implementación y mantenimiento	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
3. Requisitos de energía y fuente de alimentación	incógnita		incógnita							
4. Alcance de la comunicación y limitaciones geográficas			incógnita							
5. Demandas y capacidades computacionales Toma de decisiones:					incógnita		incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
1. Seleccionar qué datos recopilar y cuántos	incógnita	incógnita				incógnita	incógnita			
2. Desarrollo y ejecución de algoritmos de control						incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
3. Métodos de evaluación del desempeño						incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
4. Falta de estandarización	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
Incertidumbre:										
1. Incertidumbre y ruido en las mediciones de sensores	incógnita					incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
2. Incertidumbre en las fuentes de datos externas					incógnita					incógnita
3. Requisitos de validación y limpieza de datos				incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
4. Incertidumbre en el desempeño y lagunas de conocimiento				incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
5. Consecuencias negativas no deseadas						incógnita	incógnita	incógnita	incógnita	incógnita
Seguridad:										
1 Ciberseguridad			incógnita	incógnita	incógnita					

* T2: Detección de activos, T3: Recopilación de datos, T4: Comunicación de datos, T5: Gestión de datos, T6: Análisis de datos e integración de datos externos, C2: Operación activa, C3: Optimización fuera de línea, C4: Control en línea (nivel de activo), C5: Control en línea (nivel de sistema), C6: Optimización en línea.

disponibles, no necesariamente se han aplicado previamente ni probado en el dominio de las aguas pluviales, y aún es necesario implementarlos a escala para que se demuestre su eficacia práctica (Webber y otros, 2022).

En segundo lugar, siguen existiendo lagunas en el mercado de sensores, en particular para aplicaciones de calidad del agua, donde las tecnologías no están en el mismo nivel de madurez que para la cantidad de agua debido a los desafíos asociados con la medición en tiempo real de contaminantes químicos y biológicos (Campisano y otros, 2013). En particular, sigue existiendo la necesidad de sensores in situ asequibles y fiables para metales, nutrientes y contaminantes emergentes si se quieren comprender plenamente los impactos del control en la eliminación de contaminantes. Kerkez y otros, 2016).

Con respecto a la recopilación y comunicación de datos, se requieren tecnologías que sean robustas ante interferencias y altamente seguras (Olatinwo y Joubert, 2019). Existen varias opciones; sin embargo, obtener la confiabilidad suficiente puede ser un desafío en algunos casos. Las tecnologías de redes de área extensa de baja potencia (LPWAN), como SigFox y LoRa, por ejemplo, operan en bandas sin licencia y están sujetas a pérdidas de paquetes de datos y, por lo tanto, a brechas de datos debido a interferencias. Oberascher y otros, 2022). Sin embargo, estas tecnologías aún pueden representar la solución preferida debido a los menores costos de implementación, y por lo tanto debe abordarse la cuestión de la confiabilidad.

La disponibilidad y fiabilidad de los modelos para el control en tiempo real pueden plantear un desafío adicional (Xu y otros, 2021). Si bien existen modelos de aguas pluviales, estos no se han desarrollado para interactuar con datos en tiempo real, y los datos de cuenca se utilizan predominantemente para la parametrización (Mullapudi y otros, 2017). La necesidad de que los modelos funcionen y mantengan su fiabilidad con diferentes niveles espaciales y temporales de datos en tiempo real planteará un desafío adicional. Sin embargo, si bien se requerirán modelos en tiempo real para la implementación de sistemas de control, se ha sugerido que los modelos de control de aguas pluviales podrían no necesitar ser tan complejos como los utilizados actualmente para la simulación. Mullapudi y otros, 2017).

Por último, la disponibilidad de soluciones integrales sigue siendo limitada, ya que pocos proveedores pueden demostrar una implementación totalmente coordinada o a escala de red de una solución inteligente sinérgica que ofrezca un servicio integral a las empresas de servicios públicos o a los consumidores. Si bien el mercado de soluciones integrales está en desarrollo y las empresas están desarrollando ofertas para ello, la falta de instalaciones y servicios integrales implica que los clientes suelen verse obligados a mejorar sus competencias para impulsar el cambio organizacional hacia soluciones inteligentes, lo que dificulta su adopción en el sector del agua.

2.2.1.2. Limitaciones tecnológicas y físicas. Infraestructura heredada

puede representar una barrera para la implementación de una gestión más inteligente de las aguas pluviales, ya que la capacidad existente limitará la flexibilidad para alterar el control del sistema (Eggimann y otros, 2017). La dependencia de tecnologías patentadas también está muy extendida y puede ser un obstáculo adicional para la adopción de sistemas de agua inteligentes. (Bartos y otros, 2018) debido a desafíos como la falta de interoperabilidad y flexibilidad.

Los requisitos de energía y las opciones disponibles de suministro eléctrico pueden ser un obstáculo para el uso de algunas tecnologías. En el nodo sensor, por ejemplo, el módulo de comunicación suele ser el principal consumidor de energía, pero las opciones consolidadas, como las redes celulares convencionales, no están optimizadas para aplicaciones de bajo consumo. (Olatinwo y Joubert, 2019). Si bien las tecnologías de comunicación LPWAN apuntan a abordar este desafío, aún no se recomiendan para su uso en aplicaciones que requieren alta resolución temporal, ya que esto aumenta la demanda de energía. (Oberascher y otros, 2022). También es necesario considerar las posibles compensaciones entre los requisitos de energía y el alcance de la comunicación.

La facilidad de implementación y mantenimiento es un atributo esencial para los sistemas eficientes de gestión inteligente del agua (Singh y Ahmed, 2021); sin embargo, al seleccionar las tecnologías de comunicación puede ser necesario encontrar un equilibrio entre los requisitos de instalación y mantenimiento y la fiabilidad de la transmisión de datos (Oberascher y otros, 2022) – los sistemas con mayor demanda de energía, por ejemplo, pueden permitir una transmisión de datos más confiable y/o frecuente, pero necesitan una fuente de alimentación cableada o la instalación de paneles solares, o visitas de mantenimiento adicionales para reemplazar la batería.

Otras posibles barreras específicas de las tecnologías de telemetría incluyen el alcance de las comunicaciones y las limitaciones geográficas, y la elección de soluciones apropiadas depende en gran medida de los requisitos espaciales (Oberascher y otros, 2022). La cobertura celular no es universal, por ejemplo, y alternativas como LoRa pueden requerir la instalación de estaciones base y el mantenimiento de infraestructura adicional para proporcionar el alcance necesario. También puede haber dificultades para retransmitir señales desde ubicaciones subterráneas (como alcantarillas), aunque se están realizando investigaciones sobre posibles soluciones; por ejemplo, las pruebas de una red de malla LoRa en el Observatorio Suizo del Agua Urbana. (Ebi y otros, 2019). El tamaño del ancho de banda también puede estar limitado para algunas opciones de comunicación (Oberascher y otros, 2022), limitando así el número de mediciones que se pueden transmitir a la vez desde un solo dispositivo.

Por último, satisfacer las demandas computacionales del procesamiento y modelado de datos puede suponer un desafío adicional. Los nuevos modelos deberán actualizar sus estados utilizando datos de sensores para reflejar las condiciones en tiempo real y ser robustos a la incertidumbre, pero también ejecutarse con la suficiente rapidez para permitir la toma de decisiones de control. (Mullapudi y otros, 2017). Sin embargo, aunque el hardware y las técnicas mejoradas están proporcionando avances en este ámbito (Eggimann y otros, 2017), el tiempo necesario para optimizar redes complejas sigue siendo un desafío tecnológico clave (Webber y otros, 2022).

2.2.1.3. Toma de decisiones. Es necesario tomar decisiones en múltiples etapas del desarrollo de sistemas inteligentes de gestión de aguas pluviales. Por ejemplo, durante la planificación de la detección de activos y la implementación de la recopilación de datos, es necesario decidir dónde se recopilarán los datos, qué tipos y con qué frecuencia. Debe haber datos suficientes y apropiados disponibles para los modelos que se utilizarán, pero una mayor cantidad no es necesariamente mejor, especialmente considerando los costos asociados. Además, la cantidad de datos requerida puede variar entre aplicaciones, y después de alcanzar cierta resolución, los beneficios adicionales obtenidos disminuirán gradualmente; sin embargo, determinar esta resolución óptima puede resultar difícil, ya que la forma de esta trayectoria será específica de la aplicación. (Eggimann y otros, 2017) Si bien actualmente no se comprende qué constituye una "resolución óptima", es posible seguir avanzando en el apoyo a la toma de decisiones mediante el desarrollo y la evaluación iterativos de la aplicabilidad y las limitaciones de nuevos tipos de datos, fuentes y modelos. Esto se ve respaldado por otra literatura que aboga por el desarrollo y la revisión iterativos de fuentes de datos, como los principios clave de Barbosa para el monitoreo de aguas pluviales (2012), que resaltan los beneficios de instalar y

Evaluar nuevos sistemas de recopilación de datos para mejorar la gestión habitual con el tiempo, en lugar de suspender su aplicación hasta que se identifique una solución óptima. La toma de decisiones también es necesaria en el desarrollo y la selección de modelos y algoritmos de control. El desarrollo de reglas de control es factible para sistemas relativamente simples y estanques individuales, pero a medida que aumenta la complejidad, se vuelve cada vez más difícil garantizar un control coordinado y eficaz a nivel de sistema. (Bowes y otros, 2021). Actualmente, la optimización se logra normalmente mediante el control a escala local de un pequeño número de componentes (Kandler y otros, 2020); sin embargo, no está claro si estos sistemas de control simples basados en reglas serán robustos cuando se apliquen a sistemas distribuidos de aguas pluviales, y se anticipa que la complejidad de los algoritmos de control aumentará significativamente con el aumento del tamaño de la cuenca. (Mullapudi y otros, 2017). En última instancia, sigue existiendo la necesidad de realizar futuras investigaciones sobre el control a nivel de cuenca de múltiples componentes para la gestión de aguas pluviales (Webber y otros, 2022).

La selección de métodos adecuados de evaluación del rendimiento (que aborden cuestiones como la elección del período de evaluación y las métricas de rendimiento) puede plantear un desafío adicional. En un estudio de simulación, por ejemplo, se observó que el control en tiempo real solo reducía los caudales máximos en eventos con períodos de retorno cortos, mientras que, para tormentas de diseño más grandes, mantenía o aumentaba los caudales máximos. (Schmitt y otros, 2020) – esto indica que la eficacia o el éxito de una estrategia en particular dependerá del enfoque con el que se evalúe. Por lo tanto, se ha sugerido la necesidad de un marco para comparar objetivamente el rendimiento de los algoritmos de control implementados en sistemas inteligentes de gestión de aguas pluviales. (Rimer y otros, 2019). Sin embargo, aunque Rimer y otros (2019) Aunque se propuso un marco de ese tipo, no ha logrado una adopción generalizada.

Por último, la falta de estandarización agrava los desafíos asociados con la toma de decisiones. Si bien la estandarización de los protocolos de datos es necesaria para permitir la integración entre diferentes proveedores y sistemas, los sistemas de control inteligente actualmente tienden a utilizar software y arquitecturas propietarias que no siempre pueden migrarse fácilmente a diferentes marcos de gestión. (Webber y otros, 2022).

2.2.1.4. Incertidumbre. La incertidumbre en los datos que se utilizan como base para la toma de decisiones (ya sea mediante la operación activa o las entradas de modelos para la optimización fuera de línea, el control en línea o la optimización en línea) plantea desafíos para la gestión de los sistemas de aguas pluviales. En primer lugar, deben considerarse la incertidumbre y el ruido asociados a las mediciones de los sensores, y en segundo lugar, la incertidumbre en los datos de fuentes externas. La precisión de las predicciones meteorológicas, que presentan una gran variabilidad en el espacio y el tiempo, es ampliamente reconocida como un desafío particular, especialmente al considerar períodos de tiempo extensos. (Kerkez y otros, 2016; Eggimann y otros, 2017; Shishegar y otros, 2019; Bertrand-Krajewski y otros, 2021; Webber y otros, 2022; Xu y otros, 2021). Si bien los estudios anteriores sobre el control en tiempo real en la gestión de aguas pluviales generalmente han ignorado las incertidumbres en los pronósticos de lluvia (en su lugar, han realizado evaluaciones para períodos históricos y han utilizado observaciones reales como un pronóstico perfecto) (Xu y otros, 2021), se ha demostrado que el rendimiento suele ser peor si no se pueden predecir con certeza las precipitaciones futuras (aunque sigue siendo mejor que un sistema sin control en tiempo real). (Shishegar y otros, 2021). Las sugerencias para abordar la incertidumbre en los pronósticos incluyen: agregar infraestructura y/o funciones de control que actúen como respaldo en caso de eventos imprevistos; implementar un enfoque de optimización robusto que considere diversos escenarios; y usar un enfoque estocástico que considere diferentes probabilidades de salida para brindar una solución más confiable. (Shishegar y otros, 2021). Sin embargo, todo esto aumenta la complejidad de la transición a un sistema de gestión más inteligente.

Para abordar posibles errores e incertidumbres en los datos recopilados, es necesario implementar una validación, limpieza y evaluaciones de calidad adecuadas para garantizar que se mantenga una base de datos confiable (Oberascher y otros, 2022).

Puede generar mayor incertidumbre el uso de modelos mal construidos, calibrados o implementados. En consecuencia, la incertidumbre en

También se debe considerar el rendimiento y, en general, las brechas de conocimiento. La incertidumbre relacionada con los algoritmos de control, por ejemplo, puede afectar los beneficios del control en tiempo real, y es importante cuantificar el impacto de las incertidumbres de los datos de entrada en el rendimiento. [Kerkez y otros, 2016](#)). Actualmente, también existe una comprensión deficiente de cómo interactúan múltiples componentes de control en tiempo real en una cuenca. [Schmitt y otros, 2020](#)) y, aunque se podrían explorar escenarios de aumento de las precipitaciones, aún existe un conocimiento limitado sobre el impacto de futuros factores de estrés, como el cambio climático y la urbanización, en el rendimiento. También existe incertidumbre sobre el impacto de las intervenciones centradas en el control hidrológico y la remoción de sólidos en otros posibles indicadores de rendimiento, como el tratamiento de metales, nutrientes y contaminantes emergentes. [Kerkez y otros, 2016](#)).

Como resultado de estas incertidumbres, puede haber consecuencias negativas imprevistas que afrontar. Los beneficios obtenidos a nivel local, por ejemplo, podrían eliminarse a nivel de cuenca, ya que la implementación de las mejores prácticas de gestión local puede generar condiciones adversas a mayor escala si no se consideran los resultados globales. [Emerson y otros, 2005](#); [Ibrahim, 2020](#); [Mullapudi y otros, 2018](#)). Otros riesgos potenciales incluyen el aumento de la erosión aguas abajo debido a un aumento en el tiempo en que el caudal permanece por encima del umbral de movilización de sedimentos aguas abajo ([Xu y otros, 2021](#)). Es importante que las incertidumbres inherentes a las nuevas tecnologías, junto con una industria reacia al riesgo que requiere evidencia práctica, no impidan el desarrollo de estudios piloto que permitan desarrollar dicha evidencia. Por lo tanto, es posible adoptar enfoques de diseño de ingeniería que brinden flexibilidad para adaptar y acomodar nuevos aprendizajes mientras se desarrolla evidencia práctica. Esta flexibilidad puede adaptarse a partir de los marcos de incertidumbre y filosofías de diseño existentes, como la antifragilidad. [Babovic y otros, 2018](#)), Vías adaptativas ([Manocha y Babovic, 2018](#)) y flexibilidad en el diseño de ingeniería ([de Neufille y Scholtes, 2011](#)).

2.2.1.5. Seguridad. La instalación de sensores distribuidos, actuadores y control en tiempo real en los sistemas de aguas pluviales introduce riesgos de ciberseguridad ([Kerkez y otros, 2016](#); [Xu y otros, 2021](#)). Los riesgos en los sistemas que dependen de sensores incluyen, por ejemplo, fuga de información, transmisión de patrones o comandos maliciosos de sensores, inyección de datos falsos de sensores y denegación de servicio. [Sikder y otros, 2021](#)).

Los desafíos particulares de seguridad cibernética para las aplicaciones de IoT incluyen la seguridad de la red, la gestión de la comunicación de datos, la autenticación y la autorización, y los siguientes constituyen requisitos de seguridad clave: identificación del usuario, gestión de la identidad, comunicación segura de datos, red segura, almacenamiento seguro, entorno de ejecución de software seguro, contenidos seguros y resistencia a la manipulación. [Burhan y otros, 2018](#)).

Una encuesta reciente ([Naughton y otros, 2021](#)) ha sugerido que estas son una de las preocupaciones de menor prioridad de los ingenieros municipales y consultores; sin embargo, no gestionar estos riesgos adecuadamente puede generar nuevos riesgos para la salud y la seguridad públicas, reducir la confianza en los nuevos sistemas y plantear más barreras para la realización de beneficios potenciales. [Kerkez y otros, 2016](#)).

La seguridad física plantea un desafío adicional y se analiza en el apartado de las barreras socioeconómicas.

2.2. Socioeconómico

A pesar de la existencia de numerosos desafíos técnicos, gran parte de la tecnología necesaria para la gestión inteligente de las aguas pluviales ya existe, y las barreras finales son socioeconómicas ([Webber y otros, 2022](#)) En esta sección se presentan las cuestiones socioeconómicas clave.

2.2.2.1. Confianza y desconfianza. La falta de familiaridad y confianza en las nuevas tecnologías se citan con frecuencia como barreras para la implementación de sistemas de gestión de aguas pluviales más inteligentes (por ejemplo, [Frantzeskaki, 2019](#); [Webber y otros, 2022](#); [White y otros, 2018](#)), y la aversión al riesgo tanto por parte de los profesionales como del público es una causa clave de la resistencia al cambio.

([Barbosa y otros, 2012](#)). Esto está respaldado por los resultados de una encuesta realizada [Naughton y otros \(2021\)](#), lo que reveló que casi el 30% de los encuestados no estaban familiarizados con los sistemas en tiempo real y el 50% no estaba seguro de que los controles en tiempo real fueran una forma eficaz de gestionar las aguas pluviales; solo el 38% los percibía como eficaces. La incertidumbre en el rendimiento fue identificada por los encuestados como una preocupación.

Aunque los beneficios de los sistemas inteligentes de aguas pluviales se han demostrado en estudios de modelado (por ejemplo, [Lund y otros, 2020](#); [Sharior y otros, 2019](#); [Shishegar y otros, 2021](#)) y en activos individuales (por ejemplo, [Gilpin y Barrett, 2014](#); [Middleton y Barrett, 2008](#)), sigue existiendo la necesidad de contar con proyectos piloto y demostradores a escala de cuenca que aporten mayor evidencia de los beneficios aspiracionales.

También puede haber temores sobre la longevidad o la inestabilidad de las nuevas tecnologías. Noticias recientes de que el proveedor de comunicaciones SigFox ha sido declarado en quiebra ([Hombre negro, 2022](#)), por ejemplo, ilustra que tales preocupaciones pueden estar justificadas y que se requiere un esfuerzo constante más allá del despliegue para mantener la confianza de quienes utilizan las tecnologías.

La confianza y la necesidad de fomentarla también son un tema recurrente en los siguientes temas socioeconómicos. Sin embargo, cabe destacar que la confianza pública y científica en las prácticas hidrológicas basadas en datos ha aumentado en los últimos años, especialmente en entornos ricos en datos, donde enfoques como el aprendizaje automático se están generalizando. Por ejemplo, en la modelización de la precipitación y la escorrentía ([Herath y otros, 2021](#)), modelado de aguas subterráneas ([Cai y otros, 2021](#)) y el monitoreo y modelado de la calidad del agua a escala de cuenca ([Wang y otros, 2019](#)). Es probable que las tecnologías impulsadas por la IoT desarrollen un entorno rico en datos para los sistemas de aguas pluviales, donde es probable que las oportunidades creadas por los datos en otras áreas de la hidrología generen confianza en las herramientas, los métodos y los análisis utilizados en las aguas pluviales.

2.2.2.2. Inflexibilidad institucional y resistencia al cambio. La implementación de un enfoque inteligente y basado en datos para la gestión de aguas pluviales requiere un cambio en las prácticas, incluso en cómo se operan las redes y se toman las decisiones ([Hering y otros, 2013](#)); sin embargo, estos cambios institucionales pueden ser complejos y consumir mucho tiempo ([Eggimann y otros, 2017](#)), lo que supone una barrera. Además, existe una tendencia general a la aversión al riesgo en la gestión del agua, lo que no favorece la promoción de cambios innovadores. [Eggimann y otros, 2017](#); [Kiparsky y otros, 2016](#)).

La resistencia al cambio se ha identificado como un impedimento importante para la gestión sostenible de las aguas pluviales urbanas en Australia y los EE. UU. ([Roy y otros, 2008](#)).

2.2.2.3. Gastos (de capital y operativos) y recursos. La transición a sistemas de gestión de aguas pluviales más inteligentes implicará costos de capital y operativos, incluidos los de sensores y actuadores, energía, comunicación de datos, gestión de datos y la operación y el mantenimiento asociados, y requerirá recursos de personal.

Los sistemas de gestión inteligente pueden realmente resultar en menores costos del ciclo de vida. [Kerkez y otros \(2016\)](#), por ejemplo, describen dos estudios a escala piloto en los EE. UU. donde una modernización del control en tiempo real tendría costos de ciclo de vida tres veces menores que la alternativa pasiva equivalente, y [Xu y otros \(2021\)](#) se destacó que la implementación de la monitorización y el control en tiempo real puede permitir un tamaño de sistema más pequeño y reducir los requisitos de mantenimiento a largo plazo. Sin embargo, la compensación entre el costo y los beneficios potenciales puede ser difícil de cuantificar debido a las dificultades asociadas con la previsión de los efectos del aumento de datos y la monetización de ventajas como una mayor flexibilidad. [Eggimann y otros, 2017](#)), y los altos costos siguen siendo una preocupación clave y un impedimento para la adopción a gran escala ([Naughton y otros, 2021](#); [Singh y Ahmed, 2021](#)).

Si bien los costos se han reducido significativamente en los últimos años ([Singh y Ahmed, 2021](#)) y un mayor acceso a sensores económicos y tecnologías de comunicación significan que implementar y mantener grandes redes de sensores ahora es factible para muchos servicios públicos ([Bartos y otros, 2018](#)), la confianza en el costo total de la vida útil es crucial, y la evidencia de los sitios de demostración será clave para brindar la confianza necesaria para

una adopción más amplia (Webber y otros, 2022).

2.2.2.4. Propiedad y modelos de negocio. La propiedad de infraestructura inteligente para aguas pluviales puede representar un desafío, ya que debe implementarse en toda la cuenca, incluso en lugares que no pertenecen a los responsables de su operación. La propiedad mixta entre actores públicos y privados puede añadir complejidad, ya que los sistemas deben ser interoperables para proporcionar control a nivel de cuenca. (Kerkez y otros, 2016) La propiedad también es importante desde una perspectiva de costos, es decir, quién cubre los costos de capital y las facturas operativas.

2.2.2.5. Conocimientos y orientación insuficientes. La implementación de sistemas inteligentes de aguas pluviales requerirá habilidades no tradicionales que abarquen ingeniería eléctrica y informática (Kerkez y otros, 2016), y la falta de familiaridad con las tecnologías requeridas y la falta de orientación sobre cómo construir las actualmente obstaculizan su adopción (Bartos y otros, 2018; Naughton y otros, 2021). El desarrollo de los sistemas de control también suele requerir un conocimiento experto del sistema de drenaje urbano (Schmitt y otros, 2020). Sin embargo, se están proponiendo cada vez más soluciones, como la guía web para 'Open Storm', que pretende capacitar a los recién llegados para desarrollar e implementar sus propios sistemas inteligentes basados en la pila de hardware y la plataforma de servicios en la nube de Open Storm (Bartos y otros, 2018), así como recursos en línea de empresas como OptiRTC (OptiRTC, 2023) y el Grupo de Interés de Sensores para el Agua (TRAGO, 2023).

Una mayor familiaridad con los sistemas inteligentes de aguas pluviales también podría ayudar a abordar el desafío de la confianza y la falta de confianza en las tecnologías, y disipar las preocupaciones percibidas relacionadas con los costos y los requisitos de operación y mantenimiento.

2.2.2.6. Regulación, normas y falta de incentivos. Los problemas de confianza se ven agravados por la incertidumbre sobre la regulación, que, en el mejor de los casos, está relacionada con una gestión inteligente de las aguas pluviales, que es fragmentaria. (Webber y otros, 2022). Esto es particularmente desafiante ya que la gestión de aguas pluviales está impulsada por regulaciones, con la necesidad de mantener el cumplimiento, y si no hay incentivos regulatorios, la adopción de tecnologías inteligentes es muy poco probable. (Naughton y otros, 2021). Como tal, la falta de un mandato legislativo es un impedimento importante para la gestión sostenible de las aguas pluviales urbanas. (Roy y otros, 2008). Más allá de la regulación, también existe una falta de incentivos financieros, y es necesario investigar modelos de negocios que aborden diferentes permutaciones de propiedad centralizada, descentralizada, pública y privada, control y relaciones de incentivos para impulsar la inversión. (Webber y otros, 2022; Xu y otros, 2021).

También son cruciales unas normas claras cuando los componentes del sistema están distribuidos a lo largo de la cuenca e incluyen activos nuevos que pueden no ser operados por la empresa de agua que proporciona la gestión general. (Hoang y Fenner, 2016).

2.2.2.7. Privacidad y preocupaciones éticas. Aunque no todos los datos recopilados en sistemas inteligentes de aguas pluviales son sensibles, la privacidad sigue siendo un problema social clave en la gestión del agua urbana basada en datos, y la dependencia de sistemas "inteligentes" aumenta la vulnerabilidad potencial a los delitos cibernéticos. (Eggimann y otros, 2017). Además, las cuestiones éticas deben considerarse suficientemente siempre que se implemente la inteligencia artificial con fines de control. (Oberascher y otros, 2022) – por ejemplo, la ética de redirigir el agua de una inundación a una ubicación alternativa, "preferible" (si la inundación es inevitable) puede suponer un obstáculo para el uso de dichos algoritmos. Las limitaciones y deficiencias de los estudios sobre los que se diseñan las estrategias de control pueden generar otras preocupaciones éticas y morales, ya que las evaluaciones suelen basarse en abstracciones simplificadas de redes reales y, por lo tanto, no captan las variaciones sociales y económicas en la cuenca, ni las implicaciones sociales de las diferentes distribuciones de las inundaciones en la región. (Ewing y Demir, 2021).

2.2.2.8. Seguridad física. Garantizar la seguridad física de los activos instalados

En la cuenca, se considerará la seguridad de los sensores, equipos de comunicación y dispositivos de control, especialmente en zonas de acceso público. En lugares donde se sabe que el vandalismo es un problema, esto puede suponer un obstáculo para la instalación y el funcionamiento a largo plazo de sistemas inteligentes, con el riesgo constante de daños a los equipos. Es importante comprender cómo los activos pueden seguir funcionando incluso en condiciones degradadas y si las consecuencias de un daño parcial podrían generar lecturas erróneas, lo que requiere un diagnóstico continuo o un mecanismo de seguridad para evitar que fallos no registrados se propaguen en la toma de decisiones.

2.2.2.9. Necesidad de participación comunitaria. Puede ser necesaria la participación pública para las operaciones de instalación y mantenimiento. Sin embargo, dado que los efectos positivos sobre el medio ambiente no son generalmente conocidos por el público, puede ser necesario aumentar la concienciación sobre las funcionalidades de los sistemas digitalizados y los retos futuros que pretenden abordar. (Oberascher y otros, 2022).

Los avances en tecnologías de bajo costo, rápidas y eficientes pueden promover la aceptación sociotécnica en las comunidades, especialmente cuando la ciencia ciudadana puede integrar datos comunitarios en los sistemas. Por ejemplo, se han propuesto datos oportunistas de dispositivos como cámaras de vigilancia como formas de medir la intensidad de la lluvia al combinarlos con técnicas de visión artificial. (Allamano y otros, 2015; Jiang y otros, 2019); abriendo así una vía para interactuar con datos de la comunidad y ayudar a la aceptación de nuevas tecnologías.

3. Una hoja de ruta para la aplicación en el mundo real

Actualmente, la implementación de sistemas inteligentes de aguas pluviales se encuentra en sus primeras etapas y, como se mencionó anteriormente, existen muchas barreras potenciales que deben superarse antes de lograr su adopción generalizada. El marco proporcionado por Webber y otros (2022) (Figura 1) ofrece un método para clasificar sistemas y monitorear su progreso, estableciendo un vínculo claro entre las tecnologías implementadas y el grado de funcionalidad inteligente que el sistema puede proporcionar. Sin embargo, la transición hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales no es (necesariamente) un proceso lineal, y puede haber múltiples iteraciones de desarrollo durante las cuales se abordan diferentes barreras y se mejoran las capacidades. Por lo tanto, se presenta una nueva hoja de ruta para su aplicación en el mundo real que incorpora el marco de Webber y otros (2022) y en esta sección se propone un enfoque flexible e iterativo con oportunidad de aprender y adaptarse.

3.1. Rueda de gestión inteligente de aguas pluviales

La 'rueda de gestión inteligente de aguas pluviales', ilustrada en Figura 2a, tiene como objetivo proporcionar una hoja de ruta que pueda utilizarse para facilitar la transición hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales en el mundo real. El concepto se deriva de los principios de la gestión ágil de proyectos, cuyas características clave incluyen el cambio incremental y la retroalimentación rápida. (Fernández y Fernández, 2008).

La rueda promueve un enfoque iterativo y circular para la implementación de funcionalidades inteligentes, lo que permite la construcción gradual de sistemas con tecnologías y capacidades adicionales o mejoradas en cada iteración, a medida que se aprenden lecciones y se superan obstáculos. Fundamentalmente, la hoja de ruta y el proceso iterativo que facilita demuestran que no es necesario saberlo todo ni tener la solución a todas las barreras para poder avanzar en la transición hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales.

Los componentes de la rueda coinciden con los de Webber y otros (2022) El marco, con la incorporación de "aprendizaje y adaptación" para crear un proceso circular y destacar la oportunidad de desarrollo incremental. El círculo interior contiene las tecnologías (T1-T6) necesarias para la gestión inteligente de aguas pluviales, y el círculo exterior, las capacidades de control y operación que ofrece cada tecnología (C1-C6).

Un concepto clave que ofrece la hoja de ruta es que existe un espectro de

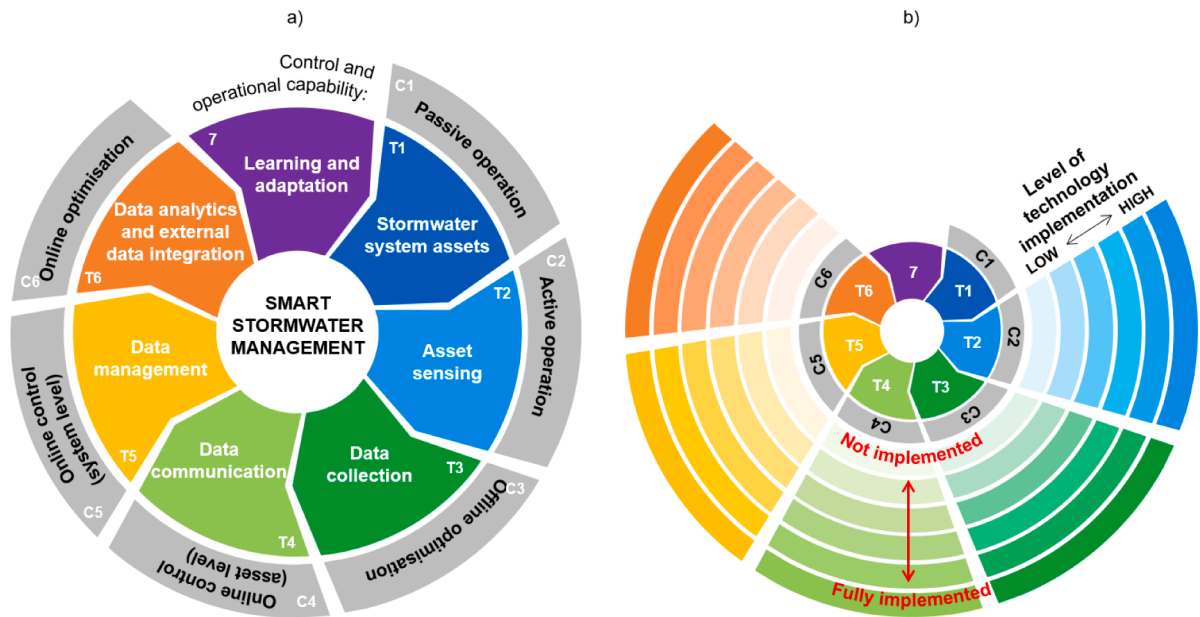


Figura 2. Rueda de gestión inteligente de aguas pluviales, que muestra a) la progresión de las tecnologías y las capacidades de control y operación; y b) los niveles potenciales de implementación.

niveles potenciales de implementación para cada tecnología (ilustrados en Figura 2b) y las tecnologías pueden implementarse en un grado variable en cada iteración: se puede hacer un circuito completo de la rueda con cero o solo una implementación parcial de algunos componentes (por ejemplo, solo se pueden instalar sensores y recolección manual de datos en la primera iteración), y esto puede permitir una expansión mejor informada de las tecnologías y capacidades implementadas en iteraciones futuras.

Los niveles potenciales de implementación para cada tecnología varían de bajo (ausente) a alto; sin embargo, para mantener la máxima flexibilidad y aplicabilidad, no se proporcionan definiciones y criterios específicos para cada nivel en la hoja de ruta, ya que estos serán específicos del contexto y deben adaptarse al sistema al que se aplica la hoja de ruta. El número de niveles de implementación para cada tecnología también es flexible. Para garantizar que la rueda se personalice adecuadamente, se sugiere que los niveles de implementación específicos del sistema para cada tecnología se definan en colaboración con la industria y las partes interesadas para cada aplicación. Esto también brinda la oportunidad de aplicar enfoques complementarios ya utilizados por los socios del proyecto, como los Niveles de Preparación Tecnológica (TRL), en apoyo de esto; con esta flexibilidad para alinearse con los recursos organizacionales existentes que respaldan la familiaridad y la aceptación en una gama de socios potenciales.

3.2. Aplicación

3.2.1. Notas sobre la aplicación práctica de un marco flexible

Este marco está concebido como una herramienta flexible y de alto nivel, adecuada para adaptarse a una variedad de circunstancias para permitir una visión holística de cómo se puede aplicar de manera iterativa la transición hacia aguas pluviales inteligentes.

Un primer paso clave para la implementación práctica consiste en identificar los componentes del sistema del usuario (T1-6) y, posteriormente, definir sus niveles (es decir, qué elementos del sistema podrían mejorarse), desde "no implementado" hasta "totalmente implementado". Este proceso debe llevarse a cabo mediante la participación de las partes interesadas para identificar los posibles niveles de implementación y asignarlos a las tecnologías correspondientes.

Por ejemplo, en cuanto a la detección de activos: Sin implementación, no habría detección. La implementación de nivel 1 equivaldría a un número básico o reducido de sensores en los componentes. La implementación completa equivaldría a una cobertura total del activo con un sensor capaz de medir tanto la cantidad como la calidad del agua.

Este proceso de mapeo requiere una participación meticulosa y metódica al inicio del proyecto y puede requerir un tiempo considerable en el caso de sistemas grandes o complejos. Sin embargo, este enfoque proporciona una manera estandarizada y sistemática de mapear exhaustivamente la transición a un sistema inteligente de aguas pluviales, que se adapta al alcance, tipo y escala de los sistemas.

3.2.2. Escala y contexto

La rueda ofrece flexibilidad en su aplicación, manteniendo su aplicabilidad para el desarrollo de sistemas inteligentes de gestión de aguas pluviales a diversas escalas y contextos. Puede utilizarse, por ejemplo, para facilitar la transición de la gestión de un componente individual del sistema, o de cualquier combinación de activos distribuidos, hasta una escala de cuenca completamente integrada. También podría ser utilizada por diferentes empresas de servicios públicos y autoridades de gestión de riesgos que posean o controlen cualquier activo de gestión de aguas pluviales en una cuenca.

3.2.3. Superar las barreras para aumentar la funcionalidad inteligente

La rueda de gestión inteligente de aguas pluviales proporciona un enfoque paso a paso para superar las barreras a la funcionalidad inteligente, permitiendo abordarlas de forma incremental con cada iteración.

Como se mencionó anteriormente, cada tecnología puede implementarse a un nivel diferente (o no implementarse en absoluto) en cada iteración. Esto permite avanzar en pasos pequeños y manejables, sin necesidad de abordar todas las barreras relacionadas con cada tecnología de inmediato o por turnos. Cuando aún no se cuenta con suficiente conocimiento, las tecnologías pueden implementarse sabiendo que pueden presentar limitaciones y deficiencias, lo que facilita el aprendizaje y la adaptación. Esta implementación temprana de las tecnologías, incluso cuando se conocen los posibles desafíos, puede proporcionar el conocimiento necesario para abordar las barreras clave con solidez, aumentando así las posibilidades de éxito a largo plazo.

Las principales barreras socioeconómicas que pueden superarse con este enfoque iterativo incluyen, por ejemplo, la falta de confianza, la inflexibilidad institucional y la resistencia al cambio. Al permitir que la transición se realice como un proceso de pequeños pasos, el marco puede ayudar a superarlas, demostrando que no es necesario un cambio repentino a un nuevo enfoque de gestión inteligente en el que no exista suficiente confianza ni aceptación; en cambio, se puede proporcionar evidencia de éxito (o de la ausencia de impactos negativos) regularmente con cada desarrollo incremental, y existen frecuentes oportunidades para la retroalimentación.

y colaboración durante un proceso de aprendizaje bidireccional para aumentar la confianza.

En cuanto a las barreras y desafíos técnicos, la hoja de ruta ofrece oportunidades periódicas de aprendizaje y adaptación. Por ejemplo, en la primera iteración se pueden instalar sensores de diversos tipos o proveedores, lo que permite evaluar su fiabilidad in situ antes de ampliar su implementación. Asimismo, se pueden probar diferentes tecnologías de comunicación (celular, LoRa, etc.) a pequeña escala para comprender mejor su rendimiento en condiciones reales en cuanto a alcance y consumo de energía, antes de decidir la solución preferida. La hoja de ruta también es idónea para abordar desafíos técnicos como la incertidumbre en las fuentes de datos y los requisitos de validación, ya que la magnitud del problema puede evaluarse tras la recopilación inicial de datos o el análisis del rendimiento operativo al utilizarlos, y las medidas de mitigación y adaptaciones pueden implementarse y probarse según sea necesario. Otras barreras podrían abordarse de forma similar mediante el enfoque iterativo para el desarrollo de sistemas inteligentes de aguas pluviales y el enfoque en el aprendizaje y la adaptación propuestos en la hoja de ruta.

3.2.4. Evaluación comparativa y mapeo del progreso

Disponer de un conjunto de niveles de implementación claramente definidos para cada tecnología, desde cero hasta la implementación completa, con definiciones y criterios específicos definidos en colaboración con las partes interesadas, brinda la oportunidad de mapear el estado actual de un sistema (ya sea a nivel de componente o de cuenca) y proporciona un marco detallado para evaluar el progreso en la transición hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales. Esto amplía la función del marco presentado por Webber y otros (2022) (Figura 1), que también proporciona capacidades de evaluación comparativa, al permitir capturar el estado actual de implementación de cada tecnología con mayor resolución. Esta es una extensión importante, ya que puede no ser factible o deseable implementar una tecnología a su capacidad máxima requerida en una sola etapa, y los diferentes niveles de implementación de un componente del marco pueden tener implicaciones en lo que se puede lograr con los componentes posteriores. Por ejemplo, aunque la recopilación de datos es un prerrequisito para la comunicación de datos, si solo se realiza una recopilación rudimentaria (por ejemplo, manual), las opciones disponibles para la comunicación de datos serán...

Restringido (p. ej., sin comunicaciones en tiempo real). En tal caso, sería útil poder registrar que tanto la recopilación de datos como la comunicación están presentes, y que las capacidades de control y operación que proporcionan podrían implementarse de forma limitada, pero también que existe margen para un mayor desarrollo en estas áreas.

Además de identificar el nivel en el que se ha implementado cada tecnología (T2–T6), también se deben resaltar las características de control y operación (C1–C6) aplicadas, ya que la capacidad proporcionada por las tecnologías presentes no necesariamente coincidirá con la funcionalidad instalada; por ejemplo, es posible que se hayan instalado sensores y se hayan recopilado y transmitido datos de estos (T2–T4), lo que teóricamente permite el control en línea a nivel de activos (C4), pero aún no se han implementado cambios en la operación pasiva predeterminada (C1) del sistema.

El estado actual y el progreso de la transición hacia la gestión inteligente de aguas pluviales también pueden representarse visualmente en la rueda. Se ofrece un ejemplo conceptual en Figura 3. Aunque cabe destacar que los niveles de implementación de la tecnología no se han definido y los sugeridos son solo ilustrativos. En este ejemplo, el nivel de implementación de cada tecnología, así como el tipo de control y operación, se destacan en un diagrama separado para cada iteración del desarrollo. (Figura 3un a Figura 3e), como se muestra en la clave. En resumen, esto muestra:

- Un sistema “tonto” sin tecnologías inteligentes y solo con funcionamiento pasivo
- Instalación de un número limitado de sensores, con datos recogidos manualmente pero que aún no se utilizan para informar la operación o el control.
- Instalación de telemetría para proporcionar transmisión casi en tiempo real de datos de los sensores y datos utilizados para la optimización fuera de línea.
- Actualización y ampliación de la instalación de sensores, basándose en el aprendizaje de los instalados en la primera iteración.
- El sistema final de gestión inteligente, tras varias iteraciones, con un alto nivel de implementación en todas las categorías tecnológicas y uso de optimización online.

En realidad, los niveles reales que representan esta transición conceptual pueden diferir de los ilustrados, dependiendo de las definiciones específicas del sistema proporcionadas por las partes interesadas. Cabe destacar también que no es

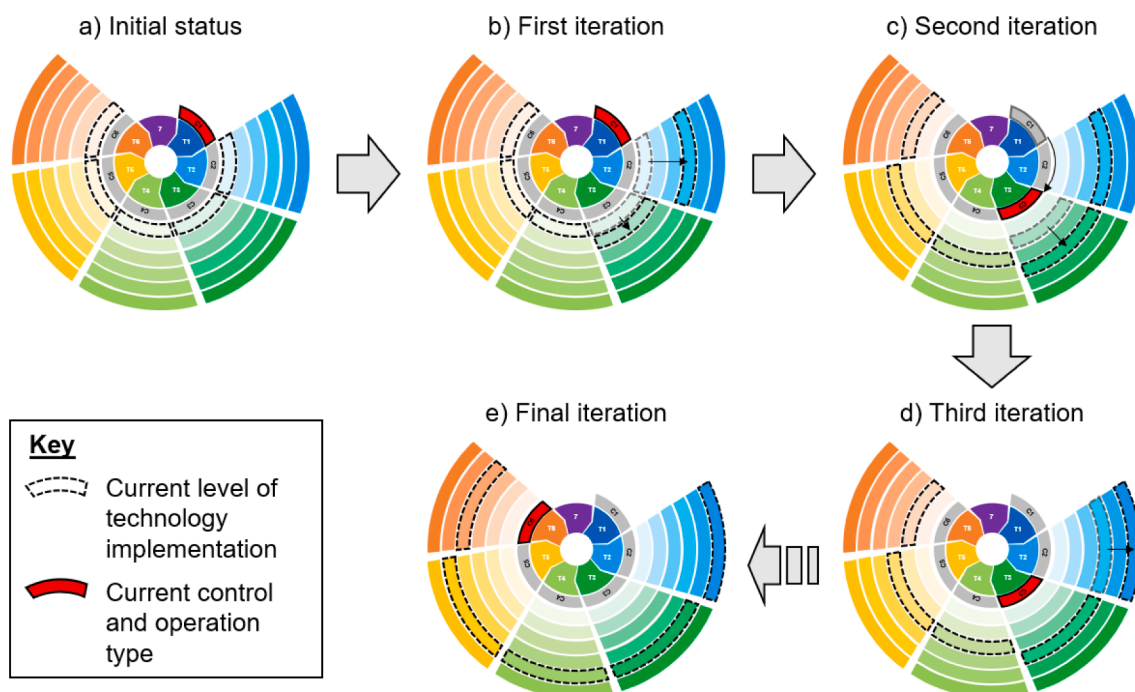


Figura 3. Ilustración conceptual de una transición iterativa hacia una gestión más inteligente de un sistema de aguas pluviales, con los niveles de tecnología correspondientes mapeados en cada iteración; Ver Figura 2 para la interpretación de los elementos de la rueda de gestión inteligente de aguas pluviales.

Es necesario proporcionar la máxima funcionalidad posible para cada tecnología con el fin de ofrecer un sistema inteligente (como se muestra en [Figura 3e](#)) y que todavía hay margen para seguir aprendiendo y mejorando.

3.2.5. Exploración de las compensaciones y relaciones entre los niveles de implementación

Por último, tras la evaluación comparativa del estado de un sistema (como en [Sección 3.2.4](#)), la rueda puede utilizarse para explorar las compensaciones y las relaciones entre el nivel de implementación de diferentes tecnologías. En particular, sería interesante saber si es posible proporcionar el mismo nivel de rendimiento en cuanto a operación y control con diversas combinaciones de tecnologías. Por ejemplo, ¿es posible lograr el mismo nivel de rendimiento utilizando sensores económicos, relativamente imprecisos o poco fiables, junto con inteligencia artificial avanzada, que utilizando sensores costosos y de alta calidad que ofrecen mayor precisión y fiabilidad? Estas preguntas pueden abordarse comparando diferentes implementaciones tecnológicas en sistemas que ofrecen funcionalidad y rendimiento inteligentes similares.

4. Conclusiones

Si bien la necesidad de mejorar la gestión de las aguas pluviales y el potencial de las soluciones inteligentes basadas en el IoT son evidentes, aún existen numerosas barreras y desafíos que superar antes de que el cambio se generalice. Se han identificado barreras en relación con todos los elementos de una gestión más inteligente de las aguas pluviales, desde la detección de activos hasta el análisis de datos y la optimización en línea, con desafíos técnicos que incluyen la disponibilidad y fiabilidad de las tecnologías, las limitaciones tecnológicas y físicas, la toma de decisiones, la incertidumbre y la seguridad.

Las barreras técnicas se están reduciendo rápidamente, ya que muchas de las tecnologías necesarias ya están disponibles y son omnipresentes en otros sectores, y sus beneficios potenciales para la gestión de aguas pluviales están cada vez más demostrados en la literatura académica. Sin embargo, problemas socioeconómicos como la confianza y la desconfianza, la resistencia al cambio, los gastos y la falta de conocimiento y orientación siguen siendo desafíos clave.

La evidencia de la revisión realizada también señala una clara brecha de conocimiento en relación con los códigos de diseño y las normas de implementación. En el Reino Unido y a nivel mundial, el sector energético debe desarrollar normas adecuadas en los manuales de diseño de alcantarillado y aguas pluviales que faciliten la inminente transición hacia un sistema de alcantarillado más inteligente. Se deben aprovechar las oportunidades para integrar las tecnologías de la cuarta revolución industrial en las herramientas de los consultores de diseño para aprovechar sus beneficios en los próximos años.

Para ayudar en la transición hacia una gestión más inteligente de las aguas pluviales, este documento ha proporcionado a) una revisión estructurada y completa de las barreras específicas que requieren abordarse, incluida la identificación de las tecnologías y/o capacidades necesarias que afectan; y b) una "rueda de gestión inteligente de las aguas pluviales" destinada a desarrollar un enfoque sistemático pero flexible para implementar una funcionalidad inteligente y evaluar el progreso.

La rueda presentada ofrece múltiples vías para futuras investigaciones, incluyendo la aplicación de estudios de caso para explorar cómo se pueden abordar las barreras específicas identificadas en este documento mediante un enfoque iterativo, y para demostrar el desarrollo y uso de niveles específicos del sistema para la evaluación comparativa y el mapeo del progreso. También existe margen para seguir desarrollando el uso de la rueda para explorar las compensaciones y las relaciones en futuras investigaciones.

Declaración de intereses en conflicto

Los autores declaran los siguientes intereses financieros/relaciones personales que pueden considerarse como posibles intereses en competencia:

Peter Melville-Shreeve y Chris Sweetapple informan que el apoyo financiero fue proporcionado por el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido. Peter Melville-Shreeve informa sobre una relación con el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido.

Esto incluye subvenciones de financiación. Peter Melville-Shreeve informa sobre su relación con Ofwat, que incluye subvenciones de financiación. Antes de 2020, el coautor Peter Melville-Shreeve fue director de un proveedor de sistemas de control en tiempo real (Over the Air Analytics Ltd).

Disponibilidad de datos

No se utilizaron datos para la investigación descrita en el artículo.

Expresiones de gratitud

Esta investigación se completó para el proyecto 'Blue Heart', financiado por el Programa de Innovación en Resiliencia Costera y ante Inundaciones del DEFRA.

Referencias

- Allamano, P., Croci, A., Laio, F., 2015. Hacia el pluviómetro de la cámara. Recursos hídricos. Res. 51 (3) <https://doi.org/10.1002/2014WR016298>.
- Anglian Water, 2021. ¿Cómo se soluciona un problema como el de las OSC? Anglian Water. <http://www.anglianwater.co.uk/news/how-do-you-solve-a-problem-like-csos/>. Consultado el 7 de octubre de 2022.
- Babovic, F., Babovic, V., Mijic, A., 2018. Antifragilidad y desarrollo urbano. Infraestructura hídrica. Int. J. Water Resour. Develop. 34 (4), 499–509. Barbosa, AE, Fernandes, JN, David, LM, 2012. Cuestiones clave para el desarrollo urbano sostenible gestión de aguas pluviales. Water Res. 46 (20), 6787–6798.
- Barraud, S., Gibert, J., Winiarski, T., Bertrand-Krajewski, JL, 2002. Implementación de un Sistema de monitoreo para medir el impacto de la infiltración de aguas pluviales. Water Sci. Technol. 45 (3), 203–210.
- Barthelemy, J., Amirghasemi, M., Arshad, B., Fay, C., Frente, H., Hutchison, N., Iqbal, U., Li, Y., Qian, Y., Perez, P., 2020. Manual de Ciudades Inteligentes. Springer International Publishing, Cham, págs. 1–28. Agosto, JC
- Bartos, M., Wong, B., Kerkez, B., 2018. Tormenta abierta: un marco completo para la detección y control de cuencas hidrográficas urbanas. Environ. Sci.-Water Res. Technol. 4 (3), 346–358.
- Bertrand-Krajewski, JL, Clemens-Meyer, F., Lepot, M., 2021. Meteorología en entornos urbanos Drenaje y gestión de aguas pluviales: Conectar y rezar. IWA Publishing, Bilodeau, K., Pelletier, G., Duchesne, S., 2018. Control en tiempo real de la detención de aguas pluviales Cuencas como medida de adaptación en ciudades medianas. Urban Water J. 15 (9), 858–867.
- Blackman, J. 2022 Sigfox se encuentra en quiebra en Francia, con seis meses para encontrarla compradores, salvar empleos. Enterprise IoT Insights. <https://enterpriseiotsights.com/2022/10/27/canales/noticias-de-ultima-hora-sigfox-en-administracion-judicial-en-francia-con-seis-meses-para-encontrar-nuevos-compradores>, consultado el 7 de octubre de 2022.
- Bowes, BD, Tavakoli, A., Wang, C., Heydarian, A., Behl, M., Beling, PA, Goodall, JL, 2021. Mitigación de inundaciones en cuencas urbanas costeras mediante el control de infraestructura de aguas pluviales en tiempo real y aprendizaje por refuerzo. J. Hydroinform. 23 (3), 529–547. Browne, S., Lintern, A., Jamali, B., Leitao, JP, Bach, PM, 2021. Aguas pluviales Impactos de la gestión de pequeñas ciudades en proceso de urbanización: la necesidad de investigar los detalles. Sci. Total Environ. 757.
- Burhan, M., Rehman, RA, Khan, B., Kim, BS, 2018. Elementos de IoT, arquitecturas en capas y cuestiones de seguridad: un estudio exhaustivo. Sensores 18 (9).
- Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C., Davies, J., 2018. Drenaje urbano, (4ª ed.). CDN Prensa, Londres.
- Cai, H., Shi, H., Liu, S., Babovic, V., 2021. Impactos de las características regionales en Mejora de la precisión de la predicción del nivel de agua subterránea mediante aprendizaje automático: el caso del centro-este continental de Estados Unidos. J. Hydrol.: Regional Stud. 37, 100930.
- Campisano, A., Ple, JC, Muschalla, D., Pleau, M., Vanrolleghem, PA, 2013. Potencial y limitaciones de los equipos modernos para el control en tiempo real de los sistemas de aguas residuales urbanas. Urban Water J. 10 (5), 300–311.
- de Neufville, R., Scholtes, S., 2011. Flexibilidad en el diseño de ingeniería (Ingeniería Sistemas). MIT Press.
- Plan de reducción de descargas por desbordamientos de tormentas del DEFRA 2022. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1101686/Plan_de_reduccion_de_desbordamientos_de_tormentas.pdf. Consultado el 6 de octubre de 2022.
- Ebi, C., Schaltegger, F., Rust, A., Blumensaat, F., 2019. Red de malla LoRa sincrónica Para monitorear procesos en infraestructura subterránea. IEEE Access 7, 57663–57677. Eggimann, S., Mutzner, L., Wani, O., Schneider, MY, Spuhler, D., de Vitry, MM, Beutler, P., Maurer, M., 2017. El potencial de saber más: una revisión de la gestión del agua urbana basada en datos. Environ. Sci. Technol. 51 (5), 2538–2553. Emerson, CH, Welty, C., Traver, RG, 2005. Evaluación a escala de cuenca hidrográfica de un sistema de Cuencas de retención de aguas pluviales. J. Hydrologic Eng. 10 (3), 237–242. Agencia de Medio Ambiente 2019 Narrativa sobre la presión de la eutrofización del fósforo y el agua dulce, Agencia de Medio Ambiente. https://consult.environment-agency.gov.uk/++preview++/medio+ambiente+y+empresas/desafios+y+opciones/user_uploads/presion-de-fosforo-rbmp-2021.pdf. Consultado el 6 de octubre de 2022.
- Agencia de Medio Ambiente 2022. Programa de innovación en resiliencia costera y ante inundaciones, Agencia de Medio Ambiente. <https://engageenvironmentagency.uk/engagementhq.com/innovation-programme>. Consultado el 1 de diciembre de 2022.
- Ewing, G., Demir, I., 2021. Un marco de toma de decisiones éticas con juegos serios: una Estudio de caso de gestión inteligente del agua en inundaciones. J. Hydroinform. 23 (3), 466–482.

- Fernández, DJ, Fernández, JD, 2008. Gestión de proyectos ágiles: agilismo versus Enfoques tradicionales. *J. Comput. Infor. Syst.* 49 (2), 10-17. Frantzeskaki, N., 2019. Siete lecciones para planificar soluciones basadas en la naturaleza en las ciudades. *Environ. Sci. Pol.* 93, 101-111.
- Gaborit, E., Muschalla, D., Vallet, B., Vanrolleghem, PA, Anctil, F., 2013. Mejora de la Rendimiento de las cuencas de retención de aguas pluviales mediante control en tiempo real mediante pronósticos de lluvia. *Urban Water J.* 10 (4), 230-246.
- Gilpin, A., Barrett, M., 2014. Informe provisional sobre la modernización de un sistema de control de inundaciones existente **Instalación para mejorar la eliminación de contaminantes en una cuenca hidrográfica urbana. Actas del Congreso Mundial de Medio Ambiente y Recursos Hídricos.** 2014, 65-74. doi:10.1061 / 9780784413548.009.
- Herath, HMV, Chadalawada, J., Babovic, V., 2021. Máquina con información hidroológica Aprendizaje para la modelización de lluvia-escorrenza: hacia la modelización distribuida. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 (8), 4373-4401.
- Hering, JG, Waite, TD, Luthy, RG, Drewes, JE, Sedlak, DL, 2013. Un cambio Marco para sistemas de agua urbanos. *Environ. Sci. Technol.* 47 (19), 10721-10726. Hoang, L., Fenner, RA, 2016. Interacciones del sistema de gestión de aguas pluviales utilizando Sistemas de drenaje urbano sostenibles e infraestructura verde. *Urban Water J.* 13 (7), 739-758.
- Ibrahim, YA, 2020. Algoritmo de control en tiempo real para mejorar el funcionamiento de la red de Instalaciones de gestión de aguas pluviales. *J. Hydrologic Eng.* 25 (2).
- Jefferson, AJ, Bhaskar, AS, Hopkins, KG, Fanelli, R., Avellaneda, PM, McMillan, S. K., 2017. Eficacia de la red de gestión de aguas pluviales e implicaciones para el funcionamiento de las cuencas hidrográficas urbanas: una revisión crítica. *Hydrol. Process* 31 (23), 4056-4080. Jiang, S., Babovic, V., Zheng, Y., Xiong, J., 2019. Avanzando en la detección oportunista en Hidrología: un enfoque novedoso para medir la precipitación con cámaras de vigilancia convencionales. *Recursos Hídricos. Res.* 55 (4), 3004-3027.
- Kandler, N., Annus, I., Vassiljev, A., Puust, R., 2020. Sostenible controlado en tiempo real Sistemas de drenaje urbano en zonas urbanas densas. *J. Water Supply Res. Technol.-Aqua* 69 (3), 238-247.
- Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M., Montestruque, L., Quigley, M., Wong, B., Bedig, A., Kertesz, R., Braun, T., Cadwalader, O., Poresky, A., Pak, C., 2016. Sistema de aguas pluviales más inteligente. *Reinar. Ciencia. Tecnología.* 50 (14), 7267-7273.
- Kiparsky, M., Thompson, BH, Binz, C., Sedlak, DL, Tummers, L., Truffer, B., 2016. Obstáculos a la innovación en los servicios de aguas residuales urbanas: actitudes de los gerentes en California. *Environ. Manage.* 57 (6), 1204-1216.
- Lund, NSV, Borup, M., Madsen, H., Mark, O., Mikkelsen, PS, 2020. Reducción de CSO en Control predictivo de modelos integrados de afluencia de aguas pluviales: una prueba de concepto simulada mediante modelos lineales sustitutos. *Recursos Hídricos. Res.* 56 (8).
- Mallakpour, I., Villarini, G., 2017. Análisis de cambios en la magnitud, frecuencia y Estacionalidad de las precipitaciones intensas en los Estados Unidos continentales. *Theor. Appl. Climatol.* 130 (1-2), 345-363.
- Manocha, N., Babovic, V., 2018. Opciones reales, optimización multiobjetivo y la Desarrollo de vías adaptativas dinámicamente robustas. *Environ. Sci. Pol.* 90, 11-18.
- McGrane, SJ, 2016. Impactos de la urbanización en la calidad hidroológica y del agua. dinámica y gestión del agua urbana: una revisión. *Hidrol. Ciencia. J.-J. Des. ciencia. Hidrológicas* 61 (13), 2295-2311.
- Middleton, JR, Barrett, ME, 2008. Rendimiento de la calidad del agua de un sistema de tipo discontinuo Cuenca de retención de aguas pluviales. *Water Environ. Res.* 80 (2), 172-178. Mullapudi, A., Wong, BP, Kerkez, B., 2017. Serie de investigadores emergentes: construyendo una Teoría para sistemas inteligentes de aguas pluviales. *Environ. Sci.-Water Res. Technol.* 3 (1), 66-77.
- Mullapudi, A., Bartos, M., Wong, B., Kerkez, B., 2018. Modelado del caudal utilizando un modelo real Red de control de aguas pluviales. *Sensores* 18 (7).
- Muschalla, D., Vallet, B., Anctil, F., Lessard, P., Pelletier, G., Vanrolleghem, PA, 2014. Control ecohidráulico en tiempo real de cuencas pluviales. *J. Hydrol. (Amst)* 511, 82-91.
- Metodología genérica de neutralidad de nutrientes de Natural England 2022. https://www.winchester.gov.uk/assets/attach/32138/Natural-England-Nutrient-Neutral-Generic-Methodology_WithDAL-ISSUE-1.pdf. Consultado el 6 de octubre de 2022.
- Naughton, J., Sharior, S., Parolari, A., Strifling, D., McDonald, W., 2021. Barreras a la Control temporal de sistemas de aguas pluviales. *J. Sustain. Water Built. Environ.* 7 (4).
- Oberascher, M., Rauch, W., Sitzenfrey, R., 2022. Hacia una ciudad inteligente del agua: una Análisis exhaustivo de aplicaciones, requisitos de datos y tecnologías de comunicación para la gestión integrada. *Sustain. Cities Soc.* 76.
- Olatinwo, SO, Joubert, TH, 2019. Habilitación de redes de comunicación para la calidad del agua Aplicaciones de monitoreo: un estudio. *IEEE Access* 7, 100332-100362. OptIRTC. 2023. Optimización de la gestión de aguas pluviales. <https://optirtc.com/Accedido> 10 de mayo de 2023.
- Persaud, PP, Akin, AA, Kerkez, B., McCarthy, DT, Hathaway, JM, 2019. Tiempo real Esquemas de control para mejorar la calidad del agua a partir de celdas de biorretención. *Blue-Green Syst.* 1 (1), 55-71.
- Radhakrishnan, V., Wu, WY, 2018. Tecnología IoT para sistemas de agua inteligentes. En: *IEEE 20th Conferencia Internacional sobre Computación de Alto Rendimiento y Comunicaciones / 16.ª Conferencia Internacional IEEE sobre Ciudades Inteligentes / 4.ª Conferencia Internacional IEEE sobre Ciencia de Datos y Sistemas (Hpc/Smartcity/Dss)*, págs. 1491-1496. Rimer, SP, Mullapudi, A., Troutman, SC, Kerkez, B., 2019. Un análisis comparativo Marco para el Control y la Optimización de Redes Inteligentes de Aguas Pluviales. Montreal, Canadá, págs. 350-351.
- Rosenberg, EA, Keys, PW, Booth, DB, Hartley, D., Burkey, J., Steinemann, AC, Lettenmaier, DP, 2010. Precipitaciones extremas e impactos del cambio climático en la infraestructura de aguas pluviales del estado de Washington. *Cambio Climático* 102 (1-2), 319-349.
- Roy, AH, Wenger, SJ, Fletcher, TD, Walsh, CJ, Ladson, AR, Shuster, WD, Thurston, HW, Brown, RR, 2008. Impedimentos y soluciones para la gestión sostenible de aguas pluviales urbanas a escala de cuencas hidrográficas: lecciones de Australia y Estados Unidos. *Environ. Manage.* 42 (2), 344-359.
- Sadler, JM, Goodall, JL, Behl, M., Bowes, BD, Morsy, MM, 2020. Explorando el tiempo real Control de sistemas de aguas pluviales para mitigar el riesgo de inundaciones debido al aumento del nivel del mar. *J. Hydrol. (Amst)* 583.
- Schmitt, ZK, Hodges, CC, Dymond, RL, 2020. Simulación y evaluación de largo plazo Rendimiento de cuencas pluviales bajo modernizaciones controladas en tiempo real. *Urban Water J.* 17 (5), 467-480.
- Grupo de Interés Sensores para el Agua (SWIG). 2023. Grupo de Interés Sensores para el Agua. <https://www.swig.org.uk/Consultado: 10 de mayo de 2023>.
- Sharior, S., McDonald, W., Parolari, AJ, 2019. Mayor confiabilidad del sistema de aguas pluviales. Rendimiento de las cuencas de retención mediante el control en tiempo real basado en datos de calidad del agua. *J. Hydrol. (Amst)* 573, 422-431.
- Shishegar, S., Duchesne, S., Pelletier, G., 2019. Una optimización integrada y un sistema de reglas Enfoque basado en la nube para el control predictivo en tiempo real de sistemas de gestión de aguas pluviales urbanas. *J. Hydrol. (Amst)* 577.
- Shishegar, S., Duchesne, S., Pelletier, G., Ghorbani, R., 2021. Un modelo predictivo inteligente Marco para la optimización de la gestión de aguas pluviales a nivel de sistema. *J. Environ. Manage.* 278.
- Sikder, AK, Petracca, G., Aksu, H., Jaeger, T., Uluagac, AS, 2021. Una encuesta sobre sensores Amenazas y ataques basados en la nube a dispositivos y aplicaciones inteligentes. *IEEE Commun. Surveys Tutorials* 23 (2), 1125-1159.
- Singh, M., Ahmed, S., 2021. Sistemas de gestión inteligente del agua basados en IoT: un análisis sistemático Reseña. *Mater. Hoy-Continúa.* 46, 5211-5218.
- Southern Water 2023. Southern Water se vuelve proactiva en el mantenimiento del alcantarillado. <https://www.southernwater.co.uk/the-news-room/the-media-centre/2023/march/southern-water-goes-proactive-on-sewer-maintenance>. Consultado el 5 de abril de 2023. Taylor, SL, Roberts, SC, Walsh, CJ, Hatt, BE, 2004. Urbanización de cuencas hidrográficas y Aumento de la biomasa de algas bentónicas en arroyos: vinculación de los mecanismos con la gestión. *Freshw. Biol.* 49 (6), 835-851.
- USEPA 2023. Descargas de aguas pluviales de actividades de construcción. <https://www.epa.gov/npdes/descargas-de-aguas-pluviales-actividades-de-construccion>. Consultado el 5 de abril de 2023. Wang, X., Zhang, J., Babovic, V., Gin, KYH, 2019. Un enfoque integrado y completo Enfoque de monitoreo y modelado a escala de cuenca para facilitar la gestión de la calidad del agua. *Environ. Model. Software* 120, 104489.
- Webber, JL, Tyler, CR, Carless, D., Jackson, B., Tingley, D., Stewart-Sinclair, P., Artioli, Y., Torres, R., Galli, G., Miller, PI, Land, P., Zonneveld, S., Austen, MC, Brown, AR, 2021. Impactos del uso del suelo en la calidad del agua y la viabilidad de la maricultura de bivalvos en el Reino Unido: un estudio de caso y una revisión del suroeste de Inglaterra. *Environ. Sci. Pol.* 126, 122-131.
- Webber, JL, Fletcher, T., Farmani, R., Butler, D., Melville-Shreeve, P., 2022. Mudarse a Un futuro de gestión inteligente de aguas pluviales: revisión y marco para la terminología, la investigación y las perspectivas futuras. *Water Res.* 218.
- White, I., Connelly, A., Garvin, S., Lawson, N., O'Hare, P., 2018. Resiliencia ante inundaciones Tecnología en Europa: identificación de barreras y coproducción de buenas prácticas. *J. Flood Risk Manage.* 11, S468-S478.
- Whitfield, PH, 2012. Inundaciones en climas futuros: una revisión. *J. Flood Risk Manage.* 5 (4), 336-365.
- Xu, WD, Burns, MJ, Cherqui, F., Fletcher, TD, 2021. Mejora del control de aguas pluviales Medidas con tecnología de control en tiempo real: una revisión. *Urban Water J.* 18 (2), 101-114.
- Yasin, H., Zeebaree, S., Sadeeq, M., Ameen, S., Ibrahim, I., Zebari, R., Ibrahim, R., Sallow, A., 2021. Sistema inteligente de gestión, monitoreo y control del agua basado en IoT y TIC: una revisión. *Asian J. Res. Comput. Sci.* 8 (2), 42-56.