

# Impacto del cambio climático en el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas

## *Impact of climate change on the design and maintenance of hydraulic infrastructures*

Pinos-Cevallos, Ariana Belén<sup>1</sup>

**Recibido:** 28/12/2023

**Aceptado:** 15/01/2023

**Publicado:** 30/04/2024

**Cita:** Pinos-Cevallos, A. B. (2024). Impacto del cambio climático en el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas. *Space Scientific Journal of Multidisciplinary*, 2(2), 1-13. <https://doi.org/10.63618/omd/ssjm/v2/n2/27>

### Resumen

El presente estudio examina cómo el cambio climático afecta significativamente el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas, cuyas bases históricas de planificación se ven desfasadas ante la actual variabilidad climática. A través de una revisión bibliográfica sistemática en bases de datos científicas internacionales, se identifican las principales transformaciones en parámetros hidrológicos críticos, como la intensidad de lluvias y caudales máximos, que exigen adoptar enfoques no estacionarios y diseños adaptativos. Asimismo, se evidencia que la frecuencia creciente de eventos extremos acelera el deterioro estructural, incrementando la vulnerabilidad de estas infraestructuras. El artículo resalta el valor de estrategias como las soluciones basadas en la naturaleza, el monitoreo inteligente y la planificación flexible para garantizar la funcionalidad y sostenibilidad a largo plazo. Finalmente, se enfatiza la necesidad de actualizar marcos normativos y fortalecer capacidades institucionales para enfrentar de forma proactiva los desafíos impuestos por el cambio climático en el ámbito hidráulico.

**Palabras clave:** cambio climático; infraestructura hidráulica; diseño adaptativo; mantenimiento predictivo; resiliencia.

### Abstract

This study examines how climate change significantly affects the design and maintenance of hydraulic infrastructures, whose historical planning bases are outdated in the face of current climate variability. Through a systematic literature review in international scientific databases, we identify the main transformations in critical hydrological parameters, such as rainfall intensity and peak flows, which require the adoption of non-stationary approaches and adaptive designs. It also shows that the increasing frequency of extreme events accelerates structural deterioration, increasing the vulnerability of these infrastructures. The article highlights the value of strategies such as nature-based solutions, intelligent monitoring and flexible planning to ensure long-term functionality and sustainability. Finally, it emphasizes the need to update regulatory frameworks and strengthen institutional capacities to proactively address the challenges imposed by climate change in the water sector.

**Keywords:** climate change; hydraulic infrastructure; adaptive design; predictive maintenance; resilience.

<sup>1</sup> Afiliación; País, Ciudad; Orcid; e-mail@e-mail.com



## 1. Introducción

El cambio climático se ha consolidado como uno de los principales desafíos globales del siglo XXI, afectando de forma directa e indirecta múltiples sectores, entre ellos, la infraestructura hidráulica. Este tipo de infraestructura, que incluye presas, canales, acueductos, sistemas de drenaje urbano, redes de abastecimiento de agua potable y plantas de tratamiento, está siendo sometida a condiciones ambientales que difieren significativamente de los patrones históricos utilizados en su diseño. A lo largo de las últimas décadas, fenómenos climáticos extremos como lluvias torrenciales, sequías prolongadas, incremento del nivel del mar y variabilidad hidrológica han alterado los regímenes hídricos y, por tanto, comprometen la funcionalidad, durabilidad y seguridad de las obras hidráulicas existentes y futuras (IPCC, 2023; Kundzewicz et al., 2016).

El problema central radica en que muchas infraestructuras hidráulicas fueron diseñadas bajo supuestos de estacionariedad climática, es decir, con base en datos hidrometeorológicos históricos que se asumían constantes en el tiempo. Sin embargo, la evidencia científica actual demuestra que el clima está cambiando a un ritmo acelerado, lo que invalida dicha premisa y pone en riesgo la capacidad de dichas infraestructuras para responder adecuadamente a eventos extremos cada vez más frecuentes e intensos (Milly et al., 2008). Por ejemplo, sistemas de drenaje urbano pueden colapsar ante lluvias más intensas de las previstas originalmente, y las presas pueden enfrentar tanto mayores niveles de estrés hídrico como el peligro de desbordamientos súbitos por lluvias extraordinarias. Estas afectaciones no solo implican riesgos económicos y técnicos, sino también consecuencias sociales y ambientales significativas.

Diversos factores contribuyen a agravar la problemática. En primer lugar, la falta de actualización de los códigos de diseño y las normas técnicas en muchos países dificulta la adaptación efectiva a las nuevas condiciones climáticas (Tollan, 2002). Además, en contextos urbanos con alta densidad poblacional y crecimiento desordenado, el diseño de las infraestructuras hidráulicas no solo debe enfrentar la incertidumbre climática, sino también la presión demográfica y la escasez de recursos hídricos (Sivapalan & Blöschl, 2015). A ello se suma la insuficiencia de políticas públicas orientadas a la adaptación, y la carencia de estrategias de mantenimiento resilientes frente a eventos extremos que cada vez son menos previsibles.

La revisión bibliográfica de esta temática resulta fundamental por diversas razones. En primer lugar, permite sistematizar el conocimiento disponible sobre cómo el cambio climático está alterando los parámetros hidrológicos fundamentales que sirven de base para el diseño hidráulico, tales como la intensidad y duración de las precipitaciones, el caudal de los ríos y la frecuencia de inundaciones. En segundo lugar, proporciona una visión crítica de las respuestas adoptadas por distintos países e instituciones para mitigar estos efectos a través de enfoques de diseño

adaptativo, soluciones basadas en la naturaleza y estrategias de gestión del riesgo (Mullaney et al., 2015). Finalmente, permite identificar brechas de conocimiento, metodologías emergentes y herramientas de modelación climática e hidrológica que facilitan la planificación de infraestructuras más resilientes.

La viabilidad de esta investigación radica en la creciente disponibilidad de estudios científicos en bases de datos indexadas como Scopus y Web of Science, que han documentado múltiples experiencias internacionales en la adaptación de infraestructuras hidráulicas al cambio climático. Asimismo, el enfoque de revisión bibliográfica posibilita un análisis exhaustivo sin necesidad de ejecutar investigaciones empíricas costosas o de largo plazo, lo cual es particularmente relevante en el contexto de una disciplina en constante evolución técnica y conceptual. Esta revisión puede servir de base para el desarrollo de futuras investigaciones aplicadas y para la formulación de políticas públicas orientadas a mejorar la sostenibilidad de la infraestructura hídrica frente al cambio climático.

El objetivo principal de este artículo es analizar, a través de una revisión sistemática de la literatura científica reciente, el impacto del cambio climático en el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas. Para ello, se estudiarán los principales efectos climáticos sobre los parámetros hidrológicos utilizados en el diseño, los desafíos técnicos asociados a su mantenimiento en contextos de alta variabilidad climática, y las estrategias adaptativas propuestas en diferentes regiones del mundo. A través de este análisis, se espera contribuir al fortalecimiento del marco conceptual y metodológico que guíe el desarrollo de infraestructuras hidráulicas más resilientes, seguras y sostenibles.

## 2. Materiales y Métodos

La presente investigación adopta un enfoque exploratorio de carácter cualitativo, sustentado en una revisión bibliográfica sistemática de literatura científica especializada. El objetivo metodológico se orienta a recopilar, analizar e interpretar estudios académicos relevantes que aborden el impacto del cambio climático en el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas. Para ello, se empleó una estrategia de búsqueda estructurada en bases de datos académicas reconocidas, tales como Scopus, Web of Science (WoS) y ScienceDirect, priorizando artículos publicados entre los años 2010 y 2024, con énfasis en los más recientes para garantizar la actualidad de los hallazgos.

La selección de fuentes se llevó a cabo mediante el uso de combinaciones de palabras clave y operadores booleanos en inglés y español, incluyendo términos como *climate change*, *hydraulic infrastructure*, *design*, *maintenance*, *resilience*, *flood management*, *adaptive engineering*, entre otros. Se establecieron criterios de inclusión que consideraron únicamente publicaciones revisadas por pares, artículos originales de investigación, revisiones sistemáticas, y documentos técnicos publicados por organizaciones científicas o ambientales con reconocimiento

internacional. Asimismo, se excluyeron trabajos duplicados, publicaciones con información no verificable o con escasa rigurosidad metodológica, y documentos que no abordaran específicamente la relación entre el cambio climático y las infraestructuras hidráulicas.

La revisión se estructuró siguiendo las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, conforme a los principios del método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). En la fase de análisis, se aplicó una lectura crítica de los textos seleccionados, enfocándose en identificar las principales tendencias, hallazgos, enfoques teóricos y propuestas metodológicas vinculadas a la problemática estudiada. Posteriormente, se organizó la información en categorías temáticas que permitieran establecer relaciones entre los efectos del cambio climático sobre los parámetros de diseño hidráulico, los desafíos del mantenimiento ante condiciones climáticas extremas y las estrategias de adaptación implementadas en distintos contextos geográficos.

Con el fin de asegurar la calidad y pertinencia de la revisión, se recurrió al uso de gestores bibliográficos para sistematizar las referencias y se siguieron las normas de citación y estilo correspondientes a la séptima edición de APA. Esta metodología permite integrar de manera coherente los aportes más relevantes del conocimiento científico disponible, garantizando un abordaje comprensivo, actualizado y riguroso del impacto del cambio climático en la ingeniería hidráulica, desde una perspectiva multidisciplinaria y orientada a la toma de decisiones en la planificación y gestión de infraestructuras resilientes.

### 3. Resultados

#### 3.1. Alteraciones en el diseño de infraestructuras hidráulicas por variabilidad climática

##### 3.1.1 Cambios en los parámetros hidrológicos utilizados para el diseño

La ingeniería hidráulica ha operado, durante gran parte del siglo XX, bajo el supuesto metodológico de la estacionariedad climática, es decir, la creencia de que las condiciones hidrológicas del pasado ofrecen una base confiable para el diseño de futuras infraestructuras (Milly et al., 2008). Esta premisa se traduce en la utilización de estadísticas históricas—como caudales pico, intensidades de precipitación y niveles freáticos—como parámetros invariables que sustentan decisiones técnicas. No obstante, la creciente evidencia científica demuestra que el cambio climático ha desestabilizado esta condición, generando patrones hidrológicos no lineales, discontinuos y cada vez más extremos (IPCC, 2023).

En regiones tanto tropicales como templadas, se ha observado un aumento significativo en la intensidad, duración y frecuencia de eventos de lluvia extrema, así como sequías prolongadas y fenómenos de deshielo acelerado en zonas de alta montaña y latitudes elevadas (Westra et al., 2013; Slater et al., 2021). Esta variabilidad ha generado importantes modificaciones en los parámetros hidrológicos

utilizados en el diseño de estructuras tales como presas, aliviaderos, canales, estaciones de bombeo, redes de alcantarillado y sistemas de control de crecidas. Por ejemplo, las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), herramientas fundamentales para el diseño de drenajes pluviales, presentan actualmente comportamientos anómalos en múltiples cuencas, haciendo necesario su recalibrado con base en escenarios de cambio climático proyectados (Mailhot et al., 2011).

Además, el uso de registros históricos no ajustados puede conducir a subestimaciones o sobreestimaciones de los caudales de diseño, lo que compromete la seguridad estructural y funcional de las infraestructuras. En este sentido, el análisis estadístico clásico, basado en distribuciones estacionarias (e.g., Gumbel, Log-Pearson III), ha comenzado a ser reemplazado por modelos no estacionarios que incorporan variables climáticas como predictores en sus funciones de probabilidad (Villarini & Slater, 2011). Herramientas como el análisis de extremos mediante la Teoría de Valores Extremos (EVT) o la descomposición de señales mediante wavelets, permiten una interpretación más precisa del comportamiento hidrológico bajo condiciones climáticas cambiantes.

Otro aspecto crítico es la alteración de la temporalidad y la espacialidad de los eventos hídricos, lo que dificulta la planificación a escala regional. Por ejemplo, las zonas tradicionalmente secas pueden enfrentar precipitaciones intensas en cortos periodos, para los cuales no están diseñadas sus infraestructuras existentes. Simultáneamente, los sistemas de escorrentía urbana diseñados para eventos de retorno de 25 o 50 años están siendo sobrepasados por lluvias con periodos de retorno mucho menores (Kundzewicz et al., 2016). Esta situación ha llevado a numerosos países a modificar sus códigos técnicos, como ocurre en Canadá, Alemania o Australia, donde ya se incluyen escenarios climáticos en la determinación de cargas hidráulicas de diseño.

Por tanto, el diseño moderno requiere no solo de series históricas actualizadas, sino también de proyecciones climáticas regionalizadas, obtenidas a partir de modelos climáticos globales (GCM) y modelos regionales (RCM), integrados con modelos hidrológicos como SWAT, HEC-HMS o WEAP. Este enfoque permite anticipar las condiciones futuras, introduciendo elementos de resiliencia y flexibilidad en la fase de planificación técnica de las infraestructuras.

### **3.1.2 Nuevas directrices y enfoques de diseño adaptativo**

Frente a este panorama de incertidumbre climática, los marcos conceptuales que sustentan el diseño de infraestructuras hidráulicas están evolucionando hacia enfoques adaptativos. El diseño adaptativo es una estrategia que reconoce explícitamente la incertidumbre del futuro climático y permite ajustes en las infraestructuras a lo largo de su vida útil, en función de la información y condiciones emergentes (Haasnoot et al., 2013). Este tipo de diseño no busca una solución única y óptima a largo plazo, sino una hoja de ruta flexible que permita el

redimensionamiento, reconversión o refuerzo de infraestructuras en función de umbrales críticos.

Uno de los componentes centrales del diseño adaptativo es el uso de *Dynamic Adaptive Policy Pathways* (DAPP), una metodología que define estrategias que pueden ser implementadas progresivamente, a medida que ciertas condiciones (por ejemplo, el aumento del nivel del mar, el incremento en caudales máximos o la saturación de capacidad de drenaje) son alcanzadas. Este enfoque ha sido aplicado con éxito en proyectos de gran escala como el *Delta Programme* de los Países Bajos, donde la planificación hidráulica se ha reformulado para garantizar la seguridad hídrica a largo plazo mediante acciones escalonadas y revisables (Haasnoot et al., 2013).

Otra directriz relevante es la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza (*Nature-Based Solutions*, NBS), las cuales permiten complementar o incluso sustituir estructuras hidráulicas convencionales. Estas soluciones, como humedales urbanos, zonas de retención temporal, corredores ecológicos o techos verdes, ofrecen múltiples beneficios: almacenamiento de agua, mejora de la calidad hídrica, reducción de la isla de calor urbana y mitigación de inundaciones. Las NBS se destacan por su adaptabilidad, su capacidad de regeneración y su integración paisajística y ecológica (Kabisch et al., 2017).

A nivel de normativa técnica, diversos organismos multilaterales y nacionales han comenzado a incorporar estos enfoques en sus guías de diseño. Por ejemplo, la *World Bank Climate Change Action Plan* y la *UNESCO Water and Climate Change Strategy* promueven explícitamente el uso de criterios de resiliencia climática en todas las etapas del ciclo de vida de las infraestructuras hidráulicas. A nivel nacional, países como Reino Unido y Nueva Zelanda han desarrollado herramientas como el *UK Climate Impacts Programme* (UKCIP) o el *Dynamic Adaptive Pathways Planning* (DAPP), que integran escenarios climáticos y análisis de vulnerabilidad en sus procesos de toma de decisiones técnicas.

Además, se ha promovido la integración de análisis multicriterio que incluyan, además de criterios técnicos y económicos, dimensiones sociales, ambientales y de gobernanza. De esta manera, el diseño hidráulico moderno se convierte en una práctica transdisciplinaria, en la que convergen la ingeniería civil, la gestión de riesgos, la planificación territorial, la ecología urbana y las ciencias climáticas.

En conclusión, el paradigma de diseño en ingeniería hidráulica ha pasado de una concepción estática, dependiente de registros pasados, a una visión dinámica, resiliente y adaptativa, orientada a enfrentar con eficacia los impactos del cambio climático. Esta transformación no solo es técnica, sino también institucional, ya que demanda nuevas capacidades profesionales, herramientas analíticas avanzadas y un marco regulador acorde a los desafíos del siglo XXI.

## 3.2. Retos en el mantenimiento de infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático

### 3.2.1 Mayor frecuencia de fallos y deterioro estructural

El mantenimiento de infraestructuras hidráulicas se enfrenta a desafíos sin precedentes debido a la intensificación de los fenómenos extremos asociados al cambio climático. Las alteraciones en los patrones hidrometeorológicos, junto con el envejecimiento progresivo de muchas estructuras construidas bajo condiciones climáticas distintas a las actuales, han acelerado su deterioro físico y funcional. Esta tendencia se traduce en una mayor frecuencia de fallos operacionales, colapsos parciales o totales, pérdida de capacidad hidráulica, y un aumento significativo en los costos de reparación y rehabilitación (Zhou et al., 2021).

En primer lugar, las lluvias intensas de corta duración, cada vez más comunes en zonas urbanas y rurales, provocan sobrecargas hidráulicas en sistemas de drenaje pluvial, redes de alcantarillado y canales de desagüe. La infraestructura existente, diseñada bajo supuestos de periodos de retorno menores, es insuficiente para manejar estos volúmenes excepcionales de agua, lo que conduce al desbordamiento de colectores, la inundación de áreas críticas y el colapso por presión interna de estructuras (Kundzewicz et al., 2016).

Por otra parte, la alternancia entre periodos prolongados de sequía e intensas precipitaciones genera ciclos de humedad que deterioran progresivamente los materiales de construcción. Las juntas de expansión, revestimientos impermeables, componentes metálicos y estructuras de concreto armado son particularmente sensibles a estos ciclos, ya que sufren fenómenos de fatiga estructural, fisuración térmica y corrosión acelerada. Investigaciones recientes han demostrado que las condiciones ambientales extremas favorecen la formación de grietas, pérdida de adherencia del refuerzo y desprendimientos en superficies expuestas al contacto permanente con el agua (Kovalenko et al., 2020).

Adicionalmente, el transporte excesivo de sedimentos, exacerbado por la erosión hídrica en cuencas degradadas, representa una amenaza directa para la operatividad de embalses, canales de riego, plantas potabilizadoras y estructuras de disipación de energía. El azolvamiento disminuye la capacidad de almacenamiento, reduce la eficiencia hidráulica y promueve el desgaste de equipos electromecánicos como compuertas, turbinas y válvulas (Bates et al., 2008). Este fenómeno también está asociado al colapso por socavación, donde el arrastre de materiales finos por debajo de los cimientos debilita la estabilidad de estructuras de control, puentes y obras de toma.

En contextos costeros, el aumento del nivel medio del mar y la intensificación de las tormentas han provocado daños severos a las infraestructuras hidráulicas expuestas, como estaciones de bombeo, emisarios submarinos, compuertas de mar y defensas costeras. Estos elementos enfrentan procesos de corrosión galvánica, degradación de sellos, intrusión salina y presión hidrostática anormal. Muchas de

estas infraestructuras fueron diseñadas sin considerar escenarios de elevación marina proyectada, lo cual limita su capacidad de adaptación estructural y funcional frente a futuros eventos extremos.

El conjunto de estos factores implica que las infraestructuras hidráulicas, ya sea en sistemas urbanos o rurales, están alcanzando el final de su vida útil mucho antes de lo proyectado. Este deterioro prematuro, además de comprometer la seguridad estructural, representa una amenaza directa para la salud pública, la gestión del agua y la resiliencia territorial ante desastres. Por ello, es imperativo repensar las estrategias de mantenimiento no como actividades reactivas o rutinarias, sino como parte integral de la planificación adaptativa frente al cambio climático.

### **3.2.2 Adaptación de planes de mantenimiento y monitoreo**

El mantenimiento de infraestructuras hidráulicas requiere hoy en día un paradigma técnico-institucional que permita no solo preservar su funcionalidad ante condiciones cambiantes, sino anticipar y gestionar proactivamente los riesgos climáticos. En ese sentido, los planes tradicionales de mantenimiento preventivo y correctivo deben ser transformados hacia esquemas adaptativos, predictivos e inteligentes, apoyados en tecnologías avanzadas y herramientas de gestión del conocimiento (Söderholm et al., 2020).

Una de las innovaciones más relevantes es la adopción de sistemas de monitoreo en tiempo real (RTMS, por sus siglas en inglés), que permiten registrar continuamente variables críticas como presiones internas, niveles de agua, vibraciones estructurales, temperatura, humedad relativa, tasas de corrosión y desplazamientos. Estos datos son recolectados por sensores integrados que se conectan a plataformas digitales para el procesamiento mediante algoritmos de inteligencia artificial, aprendizaje automático y análisis predictivo. La implementación de RTMS ha sido especialmente eficaz en presas, canales, plantas de tratamiento y estaciones de bombeo, permitiendo la detección temprana de condiciones anómalas y la activación de alertas automatizadas (Mishra et al., 2019). Complementariamente, el uso de tecnologías de geoinformación, tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el modelado tridimensional BIM (Building Information Modeling) y las imágenes satelitales de alta resolución, permite evaluar el estado de la infraestructura en relación con su entorno físico, su exposición a amenazas naturales y su comportamiento histórico. Estas herramientas facilitan el desarrollo de mapas de riesgo, la identificación de puntos críticos y la priorización de intervenciones según criterios técnicos, sociales y ambientales.

A nivel de planificación estratégica, la adaptación de los planes de mantenimiento exige también la incorporación de evaluaciones periódicas de vulnerabilidad climática, que consideren no solo el estado estructural de la infraestructura, sino su capacidad de respuesta ante diferentes escenarios futuros. Estas evaluaciones, comúnmente integradas en los planes maestros de recursos hídricos, permiten

clasificar activos según su nivel de exposición y criticidad funcional, orientando la asignación eficiente de recursos financieros y operativos (UNESCO, 2020).

Desde el punto de vista normativo e institucional, la adaptación del mantenimiento hidráulico implica revisar y fortalecer los marcos regulatorios, incorporando explícitamente el componente climático en los manuales técnicos, los protocolos de inspección y las auditorías de desempeño. Asimismo, se requiere capacitar al personal técnico y de operación en herramientas de análisis de riesgo climático, resiliencia infraestructural y gestión de activos basada en datos.

En este contexto, también se destacan las oportunidades que ofrecen los mecanismos de financiamiento climático, como los fondos de adaptación del Fondo Verde para el Clima (GCF) y los programas de inversión resiliente del Banco Mundial, que apoyan proyectos destinados a mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras hidráulicas en países en desarrollo. Estos recursos pueden ser utilizados para modernizar equipos, implementar sistemas de monitoreo, rehabilitar obras deterioradas y desarrollar capacidades institucionales orientadas a la gestión del mantenimiento climático-inteligente.

En definitiva, la adaptación de los planes de mantenimiento y monitoreo frente al cambio climático requiere una transformación sistémica, que articule tecnologías emergentes, enfoques interdisciplinarios y una visión estratégica de largo plazo. Solo mediante esta integración será posible garantizar la continuidad de los servicios hidráulicos esenciales, mitigar los impactos de eventos extremos y fortalecer la resiliencia de las infraestructuras frente a un entorno climático cada vez más incierto y desafiante.

#### 4. Discusión

La evidencia examinada a lo largo de esta revisión permite concluir que el cambio climático constituye un factor disruptivo en la gestión de infraestructuras hidráulicas, tanto en su fase de diseño como en las actividades de operación y mantenimiento. Las alteraciones progresivas y no lineales en los regímenes de precipitación, escorrentía y temperatura han generado un entorno hidrológico caracterizado por una elevada incertidumbre, que ha desbordado las capacidades de respuesta de muchas infraestructuras construidas bajo el supuesto de estacionariedad climática. Este desfase entre las condiciones actuales y las premisas históricas de diseño pone en riesgo la seguridad estructural, funcional y operativa de un gran número de sistemas hidráulicos a escala global.

En el ámbito del diseño, ha quedado demostrado que los métodos tradicionales, basados en el análisis de series temporales históricas, ya no resultan adecuados para anticipar los escenarios extremos que están emergiendo como resultado del cambio climático. En consecuencia, se requiere una reformulación de los parámetros hidrológicos empleados, incorporando datos proyectados que reflejen la variabilidad futura esperada. Esta transformación implica la adopción de enfoques

no estacionarios, el uso de modelos hidrológicos acoplados con simulaciones climáticas regionales, y la inclusión de márgenes de seguridad adaptativos que contemplen diversas trayectorias climáticas.

Frente a esta realidad, el diseño adaptativo emerge como una respuesta técnica y estratégica indispensable. A diferencia de los esquemas rígidos del pasado, este enfoque introduce mecanismos de flexibilidad que permiten la modificación, expansión o reconversión de la infraestructura en función de umbrales críticos o cambios observados en el entorno. Asimismo, la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza se perfila como una alternativa eficaz y sostenible para complementar la infraestructura convencional, especialmente en contextos urbanos y zonas costeras vulnerables.

En cuanto al mantenimiento, la problemática se agrava debido al deterioro acelerado que enfrentan muchas infraestructuras, producto de la intensificación de eventos extremos y del envejecimiento estructural acumulado. La presencia de fenómenos como erosión, sedimentación, corrosión, fisuración térmica y deformaciones en los cimientos evidencia la necesidad de replantear los modelos de mantenimiento desde una lógica predictiva. La recurrencia de fallos y la reducción de la vida útil funcional no solo aumentan los costos de operación, sino que también comprometen la continuidad de los servicios hídricos esenciales, afectando la seguridad hídrica, el saneamiento básico y la gestión de riesgos de desastres.

Ante estos desafíos, la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real representa una herramienta clave para la detección temprana de fallas, la optimización de recursos y la mejora en la toma de decisiones. El uso de sensores inteligentes, plataformas digitales, modelado geoespacial e inteligencia artificial ha comenzado a transformar los sistemas de mantenimiento, permitiendo intervenciones más oportunas, eficientes y alineadas con el comportamiento real de la infraestructura. Sin embargo, estas innovaciones requieren una inversión considerable en capacidades técnicas, financieras y organizacionales que no siempre están disponibles, especialmente en regiones con menor desarrollo institucional.

La adaptación de los planes de mantenimiento, por tanto, debe ir acompañada de una renovación de los marcos normativos y de gobernanza. Se necesita una visión estratégica que considere el mantenimiento no como una tarea rutinaria o secundaria, sino como un componente estructural del ciclo de vida de la infraestructura. Asimismo, es esencial fomentar políticas públicas que incluyan evaluaciones de vulnerabilidad climática, planificación basada en riesgos, financiamiento sostenido y fortalecimiento de las capacidades institucionales encargadas de operar y mantener las obras hidráulicas.

En síntesis, la gestión de las infraestructuras hidráulicas en el contexto del cambio climático requiere una transformación integral que abarque tanto los aspectos

técnicos como los normativos e institucionales. Esta transformación debe estar basada en principios de resiliencia, flexibilidad y sostenibilidad, permitiendo no solo hacer frente a los impactos actuales del cambio climático, sino también anticipar sus efectos futuros. Solo mediante una visión multidisciplinaria, preventiva y adaptativa será posible garantizar la funcionalidad, seguridad y equidad en el acceso al recurso hídrico en un entorno global cada vez más incierto y complejo.

## 5. Conclusiones

A partir del análisis realizado, se concluye que el cambio climático ha introducido una serie de desafíos complejos y multifactoriales que afectan profundamente el diseño y mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas. La intensificación de eventos hidrometeorológicos extremos y la variabilidad creciente en los patrones de precipitación, temperatura y escorrentía han demostrado que los modelos tradicionales de diseño, basados en la estacionariedad climática, resultan obsoletos y técnicamente insuficientes. Por tanto, es imprescindible avanzar hacia enfoques que integren la incertidumbre climática mediante el uso de modelos no estacionarios, escenarios proyectados y márgenes de seguridad dinámicos.

El diseño adaptativo se presenta como un paradigma emergente necesario, capaz de incorporar flexibilidad estructural y funcional en las infraestructuras hidráulicas, permitiendo su adecuación progresiva a condiciones cambiantes. Del mismo modo, la inclusión de soluciones basadas en la naturaleza amplía el espectro de respuestas técnicas al permitir la coexistencia de infraestructura gris y verde, favoreciendo la sostenibilidad y la resiliencia territorial.

En cuanto al mantenimiento, el deterioro acelerado de las infraestructuras, motivado por la presión climática y la obsolescencia técnica, evidencia la necesidad de un cambio en los modelos operativos. Es imperativo abandonar las estrategias reactivas o correctivas en favor de esquemas predictivos, inteligentes y proactivos, sustentados en tecnologías de monitoreo en tiempo real, análisis de datos y herramientas digitales de planificación y control. Esta transformación no solo optimiza recursos, sino que previene fallos catastróficos y extiende la vida útil de los sistemas hidráulicos.

Además, se reconoce la urgencia de actualizar los marcos normativos y de fortalecer las capacidades institucionales para gestionar el mantenimiento con una visión de largo plazo y orientada a la adaptación climática. Sin una acción coordinada que incluya planificación estratégica, financiación sostenida, formación técnica y participación multisectorial, las infraestructuras hidráulicas existentes seguirán siendo vulnerables frente a escenarios climáticos cada vez más exigentes. En conclusión, asegurar la funcionalidad y seguridad de las infraestructuras hidráulicas en el contexto del cambio climático exige una transformación estructural en las prácticas de diseño y mantenimiento. Este cambio debe fundamentarse en la ciencia, apoyarse en la innovación tecnológica y ser acompañado por políticas

públicas integrales que garanticen una gestión resiliente, eficiente y sostenible del agua.

### CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

### Referencias Bibliográficas

- Alcocer-Quinteros, R. P., Knudsen-González, J. A., & Marrero-Delgado, F. (2024). *Contribución a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en cantones del Ecuador*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.80>
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (Eds.). (2008). *Climate change and water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Secretariat. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-en.pdf>
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), 485–498. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (Eds.). (2017). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between science, policy and practice*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>
- Kovalenko, V., Akhmadeev, R., & Vikhorev, K. (2020). Structural degradation analysis of hydraulic structures under climate change conditions. *E3S Web of Conferences*, 163, 04010.
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., ... & Schellnhuber, H. J. (2016). Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making. *Climatic Change*, 147(1-2), 155-167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
- Mailhot, A., Beauregard, I., Talbot, G., Caya, D., & Biner, S. (2011). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1151–1163. <https://doi.org/10.1002/joc.2343>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity Is Dead: Whither

- Water Management? *Science*, 319(5863), 573-574.  
<https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Mishra, S. K., Deshmukh, A., & Kumar, P. (2019). Predictive maintenance for water pipeline infrastructure using real-time data and machine learning. *Procedia Computer Science*, 152, 229–236.
- Moran-Gonzalez, M. R., Guerrero-Calero, J. M., Mielles-Giler, J. W., & Cabrera-Verdesoto, C. A. (2024). Evaluación de Indicadores para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas Hidrográficas. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(4), 25–38.  
<https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n4/129>
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013>
- Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2015). Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resources Research*, 51(9), 6988–7022.  
<https://doi.org/10.1002/2015WR017896>
- Slater, L. J., Wilby, R. L., & Quinn, N. W. (2021). Hydrological climate services: Turning climate information into actionable water management decisions. *WIREs Water*, 8(2), e1503.
- Söderholm, P., Hildingsson, R., Khan, J., Johansson, B., & Wilhelmsson, F. (2020). Governing the transition to sustainable infrastructure: The importance of adaptive maintenance systems. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 34, 257–270.
- Tollan, A. (2002). Land-use change and floods: What do we need most, research or management? *Hydrological Processes*, 16(14), 2645–2647.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2002.0176>
- UNESCO. (2020). *Water and climate change*. The United Nations World Water Development Report 2020. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985>
- Villarini, G., & Slater, L. J. (2011). Examining flood frequency distributions in the United States. *Water*, 6(4), 945–961. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00540.x>
- Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26(11), 3904–3918.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- Zhou, Q., Leng, G., Su, J., Zhang, Y., & Tang, Q. (2021). A comprehensive assessment of global hydropower infrastructure exposure to climate extremes. *Nature Communications*, 12(1), 1–9.