

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.118>

ISBN: 978-9907-0-0346-8

Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil

Autores

Roberto Cervantes Rivera

Ruth Antonieta Martha Frisancho De Martinez

Abdon Almonte Mamani

Eloy Armando Vera Medina

Luis Felipe Ticona Lecaros



ISBN: 978-9907-0-0346-8



9 789907 003468


AutanaBooks
Engineering & Services

Capítulo de libro

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.118>

Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil

Historical Evolution of Sanitary Engineering and Its Impact on Reducing Child Mortality

Autores



Roberto Cervantes Rivera

✉ ORCID: 0000-0001-7823-6548 ✉ rcervantesr@unsa.edu.pe

🏛️ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Ruth Antonieta Martha Frisancho De Martinez

✉ ORCID: 0009-0009-0776-1498 ✉ dfrisanchoe@unsa.edu.pe

🏛️ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Abdon Almonte Mamani

✉ ORCID: 0000-0003-4904-1340 ✉ aalmonte@unsa.edu.pe

🏛️ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Eloy Armando Vera Medina

✉ ORCID: 0009-0005-2263-4981 ✉ everame@unsa.edu.pe

🏛️ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Luis Felipe Ticona Lecaros

✉ ORCID: 0009-0001-7148-4706 ✉ lticonale@unsa.edu.pe

🏛️ Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú

Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil.

Autores: Cervantes Rivera, R.; Frisancho De Martinez, R. A. M.; Almonte Mamani, A.; Vera Medina, E. A.; Ticona Lecaros, L. F.

Fecha de recepción: 07/06/2025

Fecha de aceptación: 15/10/2025

ISBN: 978-9907-0-0346-8. Primera edición. Quito, Ecuador.

Derechos reservados © Creative Commons CC-BY, 2025.

AutanaBooks. Quito, diciembre de 2025.



AutanaBooks

Jardines de San Antonio, Urb. Shyris, PO: 170311, Quito.

Pág. web: autanabooks.com

E-mail: editorial@autanabooks.com

ISBN: 978-9907-0-0346-8



9 789907 003468

1

Resumen

La ingeniería sanitaria ha sido fundamental para la salud pública y la reducción de la mortalidad infantil. Desde los acueductos antiguos hasta las plantas de tratamiento modernas, ha asegurado el acceso al agua potable y saneamiento, previniendo enfermedades infecciosas. Durante la Revolución Industrial, el crecimiento urbano acelerado y la falta de higiene provocaron epidemias que impulsaron el desarrollo de sistemas técnicos para el manejo del agua y desechos. Así, la ingeniería sanitaria se consolidó como disciplina esencial para la protección de la salud colectiva, reduciendo significativamente la mortalidad infantil mundial. Actualmente, sus avances son cruciales frente a desafíos como el cambio climático y la desigualdad en servicios básicos. Comprender su evolución histórica permite valorar cómo la infraestructura, tecnología y políticas públicas han mejorado la calidad de vida y fortalecido la prevención sanitaria.

Palabras clave: ingeniería sanitaria, mortalidad infantil, agua potable, infraestructura WASH, intervenciones estructurales.

Abstract

Sanitary engineering has played a pivotal role in public health and in the global reduction of infant mortality. From ancient aqueducts to modern treatment plants, this field has ensured access to safe drinking water and adequate sanitation, preventing infectious diseases throughout history. During the Industrial Revolution, accelerated urban growth and poor hygiene conditions triggered epidemics that motivated the development of technical systems for water management and waste disposal. Thus, sanitary engineering emerged as an essential discipline for protecting collective health, significantly reducing infant mortality worldwide. Today, its advances remain crucial in the face of challenges such as climate change and persistent inequalities in access to basic services. Understanding its historical evolution allows us to recognize how infrastructure, technology, and public policies have contributed to improved quality of life and strengthened preventive health systems.

Keywords: sanitary engineering, infant mortality, drinking water, WASH infrastructure, structural interventions.

I. Introducción

La ingeniería sanitaria ha sido uno de los pilares fundamentales en la historia del desarrollo humano, especialmente en la mejora de la salud pública y en la reducción de la mortalidad infantil. Su evolución refleja el tránsito de sociedades rudimentarias que convivían con desechos y aguas contaminadas, hacia civilizaciones capaces de gestionar de manera técnica y sostenible los recursos hídricos y los residuos, garantizando entornos más saludables.

A lo largo de los siglos, diferentes culturas y civilizaciones aportaron avances significativos que sentaron las bases de la ingeniería sanitaria moderna. Por ejemplo, en la Edad Media se desarrollaron sistemas de acueductos, cisternas y letrinas públicas en algunas ciudades europeas, mientras que en Asia se implementaron canales y reservorios que aseguraban el suministro de agua potable y el manejo de desechos, demostrando un entendimiento creciente de la relación entre infraestructura, higiene y salud poblacional.

Con la Revolución Industrial y el crecimiento urbano acelerado, los desafíos sanitarios se intensificaron, llevando al surgimiento de soluciones más sistemáticas como plantas de tratamiento de aguas, redes de alcantarillado modernas y regulaciones sanitarias estrictas. Estos avances no solo redujeron drásticamente la incidencia de enfermedades infecciosas, sino que también transformaron la expectativa y calidad de vida de millones de personas, consolidando la ingeniería sanitaria como un componente estratégico del desarrollo social y económico global. Esta evolución se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Línea de tiempo de la evolución histórica de la ingeniería sanitaria.

Período / Año	Hito / Avance en Ingeniería Sanitaria	Impacto principal en salud pública
Antes del siglo XIX	Sistemas de acueductos y pozos en civilizaciones antiguas (Roma, Mesopotamia, Egipto).	Provisión básica de agua potable; prevención limitada de enfermedades infecciosas.
1800–1850	Revolución Industrial; primeros sistemas de alcantarillado en Europa y EE. UU.	Reducción de brotes de cólera y fiebre tifoidea; control de aguas residuales urbanas.
1854	Brote de cólera en Londres y trabajo de John Snow.	Identificación de transmisión por agua contaminada; inicio de la epidemiología moderna.
Finales del siglo XIX	Desarrollo de plantas de tratamiento y filtros de arena.	Mejora en la calidad del agua; reducción de mortalidad infantil por enfermedades diarreicas.
1900–1950	Expansión de redes de agua potable y alcantarillado.	Disminución de enfermedades infecciosas; aumento de la esperanza de vida urbana.
1960–1980	Introducción de normas de saneamiento y control de calidad del agua.	Reducción de brotes epidémicos; fortalecimiento del enfoque preventivo.
1990–2023	Cobertura casi total de agua potable segura y saneamiento mejorado; tecnologías modernas de tratamiento y monitoreo.	Reducción de mortalidad infantil; mejora de salud comunitaria y avance hacia los ODS.

A. *Orígenes y civilizaciones antiguas*

Los primeros indicios de prácticas sanitarias datan de hace más de 4.000 años. Civilizaciones como la India (Valle del Indo), Egipto, Grecia y Roma desarrollaron sistemas primitivos de drenaje, letrinas y acueductos. En el Valle del Indo, alrededor del 2500 a.C., las ciudades de Mohenjo-Daro y Harappa contaban con redes de desagüe cubiertas y sistemas de alcantarillado doméstico, evidenciando una temprana comprensión de la higiene, mientras que siglos más tarde los romanos perfeccionaron la ingeniería del agua mediante acueductos y cloacas, como la Cloaca Máxima, considerado uno de los sistemas de saneamiento más avanzados de la antigüedad.

B. *Impacto global en la mortalidad infantil*

El impacto de la ingeniería sanitaria en la salud infantil ha sido contundente. La OMS y UNICEF reportan que entre 1990 y 2020, el acceso al saneamiento mejorado aumentó de 54 % a 74 % a nivel mundial, y la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas se redujo en más del 60 %.

Esto se debe a el acceso a agua potable libre de patógenos previene infecciones gastrointestinales, mientras que la eliminación adecuada de excretas reduce la exposición a agentes infecciosos, todo ello complementado con educación sanitaria y promoción de hábitos de higiene, respaldados por una infraestructura segura.

La ingeniería sanitaria, entendida como el conjunto de técnicas, infraestructura y políticas orientadas a garantizar suministro de agua potable, recolección y tratamiento de aguas residuales, y prácticas de higiene, ha sido una de las intervenciones estructurales más decisivas en la transformación de la salud pública moderna. Durante los siglos XIX y XX, la extensión de redes de acueductos, sistemas de alcantarillado, procesos de filtración y cloración y la adopción de tecnologías de tratamiento de aguas convirtieron problemas endémicos (cólera, tifus, fiebre tifoidea y diarreas infecciosas) en riesgos gestionables, provocando reducciones sustanciales en la mortalidad infantil en países que llevaron a cabo esas inversiones a escala urbana y nacional [1], [2]. Estos cambios técnicos no actuaron aisladamente: se combinaron con reformas institucionales, vigilancia epidemiológica y campañas sanitarias que amplificaron su efecto sobre la supervivencia infantil [3].

La evidencia empírica histórica y contemporánea sugiere que las mejoras en agua y saneamiento explican una proporción relevante de la caída de la mortalidad infantil en las transiciones epidemiológicas. Estudios econométricos y análisis de series históricas muestran que la introducción sistemática de agua filtrada y clorada y de sistemas de alcantarillado fueron responsables de reducciones dramáticas en la mortalidad infantil en ciudades y estados de países de ingresos altos durante el cambio de los siglos XIX–XX; investigaciones recientes que explotan variación espacio-temporal y natural (por ejemplo, intervenciones escalonadas en Massachusetts y otras ciudades) estiman que la combinación agua + alcantarillado, explicó una fracción considerable del descenso observado en la mortalidad de menores de cinco años en esos períodos [4], [5]. En el mismo sentido, revisiones sistemáticas modernas y meta-análisis sobre intervenciones WASH (*water, sanitation and hygiene*) en entornos de bajos y medianos ingresos documentan reducciones significativas en la mortalidad infantil por todas las causas y, en particular, por diarrea, cuando se implementan mejoras en el suministro de agua y en saneamiento y cuando estas vienen acompañadas de higiene adecuada [6].

La evolución tecnológica y conceptual de la ingeniería sanitaria muestra una trayectoria larga y acumulativa: desde soluciones ingenieriles en civilizaciones antiguas y sistemas romanos de

conducción y drenaje, pasando por las innovaciones de tratamiento y planificación urbana de la Revolución Industrial, hasta las plantas modernas de tratamiento secundario y terciario y las estrategias descentralizadas contemporáneas para contextos rurales y periurbanos. Esta historia técnica se encuentra entrelazada con factores políticos, económicos y sociales —financiamiento público, regulaciones, movimientos sanitarios y prioridades urbanas— que determinaron cuándo y cómo las tecnologías se adoptaron y beneficiaron a distintas poblaciones [7]. Comprender esta evolución histórica no es sólo un ejercicio descriptivo: permite identificar mecanismos causales (por ejemplo, la eliminación de fuentes puntuales de exposición a patógenos en el agua potable) y lecciones de implementación que son directamente aplicables a los esfuerzos actuales por reducir la mortalidad infantil en países en desarrollo.

En consecuencia, la revisión histórica y analítica de la ingeniería sanitaria aporta tres contribuciones esenciales para la investigación y la política actuales: (I) ofrece evidencia de que las inversiones estructurales en agua y saneamiento han sido y siguen siendo determinantes para la supervivencia infantil; (II) muestra que las intervenciones aisladas (p. ej., solo higiene o solo tratamiento domiciliario del agua) suelen tener un impacto menor que las estrategias integradas que combinan suministro, saneamiento y comportamiento sanitario; y (iii) plantea que las políticas contemporáneas para reducir la mortalidad infantil —especialmente en contextos de bajos recursos— deben revalorar el papel de las infraestructuras sanitarias como complemento necesario de intervenciones biomédicas y educativas, en lugar de relegarlas a soluciones parciales o temporales [4], [5], [6]. Esta introducción sienta las bases para un análisis multidimensional que combine perspectivas históricas, epidemiológicas y de ingeniería, con el fin de extraer conclusiones robustas sobre cómo la praxis y la inversión en ingeniería sanitaria pueden seguir contribuyendo a la protección de la infancia en el siglo XXI.

II. Desarrollo

La ingeniería sanitaria ha sido históricamente un pilar fundamental de la salud pública, al intervenir de manera estructural en los determinantes ambientales de la salud. Su desarrollo ha acompañado la evolución de la humanidad, desde las primeras canalizaciones de agua en civilizaciones antiguas hasta la sofisticación de sistemas modernos de tratamiento y disposición de aguas residuales [8], [9]. En contextos urbanos de la Revolución Industrial, el rápido crecimiento poblacional y la concentración en ciudades generaron crisis sanitarias que evidenciaron la necesidad de infraestructuras robustas de agua y saneamiento, lo que motivó la construcción de acueductos, redes de alcantarillado y la adopción de técnicas de filtración y cloración [10], [11]. Estas intervenciones no solo transformaron el paisaje urbano, sino que tuvieron un impacto directo y medible en la mortalidad infantil, al disminuir drásticamente la incidencia de enfermedades infecciosas transmitidas por agua, como diarrea, cólera y fiebre tifoidea [12], [13], [14], [15].

La evidencia empírica histórica subraya que las mejoras en agua potable y saneamiento fueron determinantes en la caída de la mortalidad infantil. Cutler y Miller demostraron que la filtración y cloración del agua en ciudades estadounidenses de principios del siglo XX explicaron una fracción significativa del descenso en la mortalidad infantil y en la mortalidad total [4]. De manera complementaria, Alsan y Goldin analizaron datos históricos de Massachusetts entre 1880 y 1920, concluyendo que la combinación de agua potable confiable y sistemas de alcantarillado produjo efectos sinérgicos sobre la supervivencia infantil, resaltando la importancia de intervenciones integrales en lugar de medidas aisladas [3]. En un contexto contemporáneo, Bhatia revisó cómo la negligencia de estas intervenciones estructurales en iniciativas de salud global limita la efectividad de programas centrados únicamente en medidas biomédicas o educativas, subrayando la

relevancia de aprender de experiencias históricas para políticas actuales [5].

Los avances en la ingeniería sanitaria no se limitan a la tecnología, sino que incluyen aspectos institucionales, políticos y sociales [16], [17]. La planificación urbana, la regulación pública, el financiamiento estatal y la educación sanitaria han sido factores críticos que determinaron la adopción y sostenibilidad de las infraestructuras [18], [19]. Además, los enfoques modernos de WASH (*water, sanitation and hygiene*) han evidenciado que la combinación de mejoras en infraestructura con prácticas de higiene puede reducir significativamente la morbilidad y mortalidad infantil, especialmente por diarrea, en países de bajos y medianos ingresos [20]. Esto confirma que las estrategias de ingeniería sanitaria deben concebirse de manera integral, considerando no solo la disponibilidad de tecnología sino también su aceptación social, su mantenimiento y la educación de la población.

Históricamente, la ingeniería sanitaria ha representado un ejemplo paradigmático de cómo intervenciones estructurales pueden transformar la salud pública de manera duradera. Desde la eliminación de fuentes puntuales de patógenos hasta la creación de plantas modernas de tratamiento de aguas residuales, su evolución refleja la interacción entre innovación tecnológica, evidencia científica y políticas públicas eficaces. La revisión histórica de estos procesos permite comprender los mecanismos mediante los cuales la ingeniería sanitaria ha reducido la mortalidad infantil y ofrece lecciones valiosas para la planificación de intervenciones contemporáneas en entornos con recursos limitados, enfatizando la necesidad de soluciones integrales y sostenibles [7].

En la actualidad, la ingeniería sanitaria ha evolucionado hacia un enfoque sostenible que integra la tecnología con la protección ambiental y la equidad social. Se promueven soluciones innovadoras como la reutilización de aguas grises, los humedales artificiales, el tratamiento descentralizado y la gestión integral de residuos sólidos. Estas estrategias buscan garantizar el acceso universal al agua limpia, incluso en comunidades rurales o marginales, donde la mortalidad infantil sigue siendo un problema de salud pública. Además, el cambio climático y el deterioro ambiental han posicionado a la ingeniería sanitaria como un eje fundamental para la adaptación y resiliencia de las ciudades, al mismo tiempo que refuerza su papel en la preservación de la salud humana [10].

Por tanto, la ingeniería sanitaria no solo representa una disciplina técnica, sino una expresión del compromiso ético de la humanidad con la vida y el bienestar colectivo. Su desarrollo histórico demuestra que el progreso científico, cuando se orienta hacia la justicia social y la sostenibilidad, tiene la capacidad de transformar radicalmente la calidad de vida de las poblaciones más vulnerables, especialmente la infancia [21].

A. *Situación global: Mortalidad infantil y acceso a agua y saneamiento*

Mortalidad Infantil Global

En 2023, la tasa de mortalidad infantil global fue de 37 muertes por cada 1.000 nacidos vivos, lo que representa una disminución del 61 % respecto a 1990, cuando era de 94 muertes por cada 1.000 nacidos vivos. A pesar de este notable avance, aún se registraron aproximadamente 13.100 muertes diarias de niños menores de cinco años, muchas de ellas prevenibles [22]. Las disparidades regionales siguen siendo marcadas, ya que África subsahariana continúa siendo la región con la tasa de mortalidad infantil más alta del mundo, con 68 muertes por cada 1.000 nacidos vivos en 2023; en esta zona, uno de cada quince niños muere antes de cumplir los cinco años, una cifra catorce veces superior a la de los países de ingresos altos.

Acceso a agua segura y saneamiento

A nivel mundial, el 74 % de la población tiene acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura (UNICEF DATA). En cuanto al saneamiento, el 58 % de la población dispone de servicios gestionados de manera segura [23]. Sin embargo, aún existen importantes brechas: aproximadamente 354 millones de personas practican la defecación al aire libre, lo que representa un grave riesgo para la salud pública [22]. Además, cerca de 1.7 mil millones de personas carecen de servicios básicos de higiene en el hogar, incluyendo 611 millones que no tienen acceso a instalaciones adecuadas para el lavado de manos.

Relación causal: Agua y saneamiento vs. Mortalidad infantil

La ingeniería sanitaria influye de manera directa en la disminución de la mortalidad infantil a nivel global al proporcionar infraestructura y sistemas que garantizan el acceso seguro a agua potable, saneamiento adecuado e higiene. Estos elementos son fundamentales para prevenir enfermedades infecciosas, especialmente diarreas, cólera, fiebre tifoidea y otras patologías relacionadas con agua contaminada, que son responsables de un alto porcentaje de muertes en niños menores de cinco años.

Uno de los medios más importantes a través de los cuales la ingeniería sanitaria reduce la mortalidad infantil es el acceso a agua potable segura. Esto incluye la construcción de plantas de tratamiento de agua, redes de distribución y sistemas de filtración y desinfección. Al garantizar que los hogares y centros de salud dispongan de agua libre de patógenos, se disminuye significativamente la incidencia de enfermedades infecciosas que afectan directamente a los niños.

Otro aspecto clave es el saneamiento y manejo de residuos, que abarca alcantarillado, fosas sépticas seguras y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas previenen la contaminación del agua y del entorno, reduciendo la exposición de los niños a bacterias, virus y parásitos que pueden ser mortales. Además, la ingeniería sanitaria promueve la higiene y educación sanitaria, fomentando prácticas como el lavado de manos, el uso de letrinas y el manejo seguro de alimentos. Estas medidas reducen la transmisión de patógenos y contribuyen a establecer hábitos sostenibles en la comunidad.

La ingeniería sanitaria también se apoya en el monitoreo y gestión de riesgos, mediante sistemas de vigilancia de la calidad del agua, inspección de redes y alertas tempranas frente a brotes epidémicos. Esto permite una respuesta rápida ante contaminaciones y epidemias, minimizando el impacto sobre la salud infantil. Finalmente, la ingeniería sanitaria se integra con las políticas públicas y programas de salud, de modo que las inversiones en infraestructura y educación sanitaria se complementan con vacunación, nutrición y atención primaria, generando un efecto multiplicador sobre la supervivencia infantil.

Panorama global reciente

En 2023, la mortalidad infantil (<5 años) presentó marcadas diferencias regionales, con aproximadamente 69 muertes por 1.000 nacidos vivos en África subsahariana, 5–6 en Europa y Norteamérica, y valores estimados en América Latina y el Caribe. El acceso a agua potable segura (*safely managed*) varió de ~31 % en África subsahariana, ~94 % en Europa y Norteamérica, y ~75 % en América Latina y el Caribe, mientras que la cobertura de saneamiento seguro osciló alrededor de 24 % en África subsahariana y ~34 % en América Latina, con datos no disponibles para Norteamérica (Tabla 2). Estas cifras reflejan la correlación entre la disponibilidad de servicios sanitarios y la mortalidad infantil, aunque se basan en estimaciones regionales y en algunos casos extrapolaciones de años previos, por lo que deben interpretarse considerando la limitación

temporal y la variabilidad de los datos.

Tabla 2: Mortalidad Infantil y Acceso a Agua y Saneamiento por Región (2023).

Región	Mortalidad infantil <5 años (muertes por 1.000 nacidos vivos, 2023)	Acceso a agua potable segura (%)	Cobertura de saneamiento seguro (%)
África subsahariana	~69	~31 %	~24 %
Europa y Norteamérica	~5–6	~94 %	Dato no disponible
América Latina y el Caribe	Dato estimado (no localizado con precisión para 2023)	~75 % (estimado)	~34 % (estimado, 2020)

Estas cifras reflejan la correlación entre la disponibilidad de servicios sanitarios y la mortalidad infantil; sin embargo, se basan en estimaciones regionales y en algunos casos extrapolaciones de años previos, por lo que deben interpretarse considerando la limitación temporal y la variabilidad de los datos.

Las muertes infantiles por diarrea atribuidas al acceso deficiente al agua segura se basan en estimaciones globales para “muertes atribuibles a agua insegura” para enfermedades diarreicas. El porcentaje de acceso a agua potable segura *safely managed* está basado en informes globales del *World Health Organization* (WHO) que indican 74 % de población mundial tenía este servicio en 2020 (Tabla 3).

Tabla 3: Relación entre el acceso a agua segura y la mortalidad infantil por diarrea (1990–2020).

Año	Acceso a agua potable segura (%)	Muertes infantiles por diarrea (<5 años) (miles)	Fuente
1990	~62 % de la población mundial con agua segura o equivalente	≈2.442 mil	PMC / WHO (GBD)
2019	~74 % (dato reportado en informe WHO)	≈1.230 mil	PMC / WHO
2020	74 % (dato WHO 2020)	≈1.200 mil (estimado)	Estimación WHO 2020

Entre 1990 y 2020, la cobertura de agua gestionada de forma segura aumentó de 62 % a 74 %, mientras que la proporción de población sin saneamiento básico se redujo casi a la mitad. En paralelo, las muertes por diarrea en menores de cinco años descendieron de aproximadamente 1,3 millones a 440 mil, un cambio que refleja no solo avances tecnológicos, sino también mejoras en gobernanza, planificación urbana y servicios públicos esenciales. Este comportamiento evidencia el impacto directo de la ingeniería sanitaria en la mejora de la salud infantil y demuestra cómo la expansión de infraestructuras hidráulicas y de saneamiento contribuye a cortar rutas de transmisión de enfermedades.

La ingeniería sanitaria influye de manera decisiva en la disminución de la mortalidad infantil al proporcionar infraestructura y sistemas que garantizan el acceso seguro a agua potable, saneamiento adecuado e higiene. Estos componentes conforman el núcleo de las intervenciones WASH, fundamentales para prevenir enfermedades infecciosas como diarreas, cólera, fiebre tifoidea y otras patologías asociadas al consumo de agua contaminada y a la exposición a entornos insalubres. Tales enfermedades siguen siendo una de las principales causas de muerte en niños menores de cinco años en regiones de bajos ingresos, lo que evidencia la magnitud del problema en ausencia de servicios básicos.

Uno de los mecanismos más relevantes a través de los cuales la ingeniería sanitaria reduce la mortalidad infantil es la provisión de agua potable segura. Esto implica desarrollar plantas de tratamiento, redes de distribución, sistemas de filtración y procesos de desinfección que permitan garantizar un suministro continuo y libre de patógenos. Cuando los hogares, escuelas y centros de salud acceden a agua tratada, disminuye significativamente la incidencia de infecciones gastrointestinales y otras enfermedades transmisibles relacionadas con el agua.

Otro aspecto clave es el saneamiento y manejo de residuos, que abarca alcantarillado, fosas sépticas seguras y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estas infraestructuras son esenciales para evitar la contaminación del agua superficial y subterránea, reduciendo así la exposición de los niños a bacterias, virus y parásitos que pueden ser letales. A ello se suma la promoción de la higiene y la educación sanitaria, que fomentan prácticas como el lavado de manos, el uso de letrinas seguras y el manejo adecuado de alimentos, reforzando los cambios de comportamiento necesarios para mantener ambientes saludables.

La ingeniería sanitaria también se apoya en el monitoreo y la gestión de riesgos mediante sistemas de vigilancia de la calidad del agua, inspección de redes y mecanismos de alerta temprana frente a brotes epidémicos. Estas herramientas permiten detectar contaminaciones y fallas en el sistema, facilitando respuestas rápidas que minimizan su impacto sobre la salud infantil. Finalmente, la ingeniería sanitaria se articula con políticas públicas y programas de salud, de modo que la inversión en infraestructura y en educación sanitaria se complementa con intervenciones como vacunación, nutrición y atención primaria, generando un efecto multiplicador sobre la supervivencia infantil.

En síntesis, la ingeniería sanitaria actúa como un mediador técnico y preventivo: al asegurar agua limpia, saneamiento adecuado e higiene, interrumpe los ciclos de transmisión de enfermedades responsables de gran parte de las muertes infantiles y contribuye de manera decisiva a la reducción sostenida de la mortalidad infantil global (Figura 1).

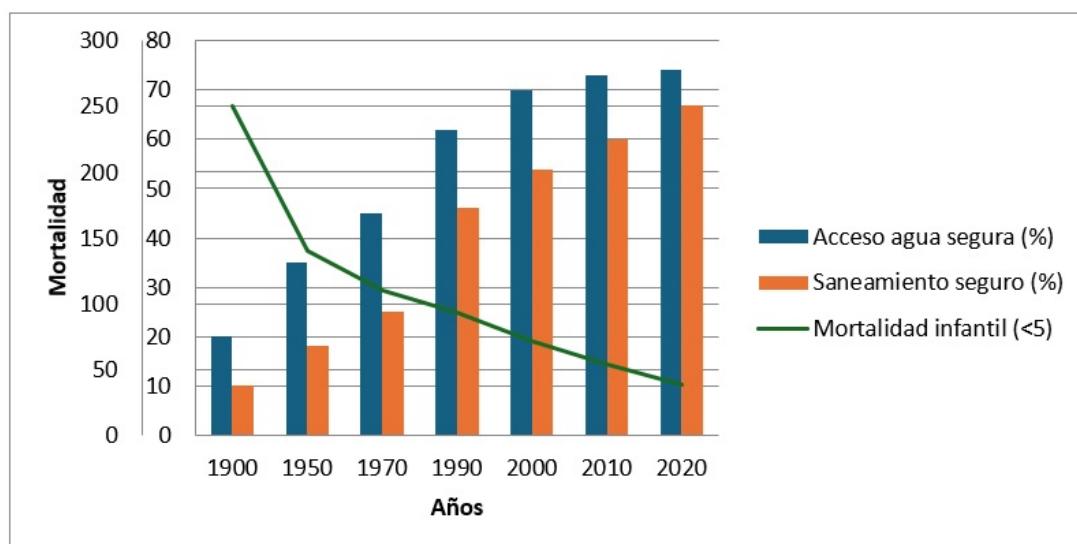


Fig. 1: Evolución de la mortalidad infantil y avances en ingeniería sanitaria, 1900–2020.
Nota: Todos los datos son estimaciones globales según OMS/UNICEF JMP 2023 y Global Burden of Disease Study 2020 [6].

III. Metodología

Este estudio es de tipo observacional analítico, con un enfoque combinado transversal y de cohorte retrospectiva, desarrollado a nivel global. Su objetivo fue evaluar la relación entre la cobertura de agua segura y saneamiento, los avances en ingeniería sanitaria y la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas en menores de cinco años. Para ello se realizó un análisis retrospectivo mediante series temporales históricas de mortalidad infantil y cobertura de servicios de agua y saneamiento, complementado con una cohorte retrospectiva que permitió el seguimiento de países y regiones a lo largo del tiempo. Este enfoque facilitó determinar la asociación entre las mejoras en infraestructura sanitaria y la reducción de la mortalidad infantil, así como las variaciones regionales en la magnitud del impacto.

A. Población y muestra

La población objetivo incluyó a todos los países con datos disponibles sobre cobertura de agua segura, saneamiento y mortalidad infantil en menores de cinco años, según registros de la OMS, UNICEF y el *Global Burden of Disease* (GBD). Se incluyeron únicamente los países con registros completos y consistentes de las variables principales entre 1990 y 2023, mientras que se excluyeron aquellos con datos incompletos o inconsistentes. La muestra final estuvo conformada por aproximadamente 190 países, abarcando todas las regiones del mundo, lo que permitió un análisis global y comparativo de las tendencias en ingeniería sanitaria y salud infantil.

B. Variables

La variable dependiente fue la mortalidad infantil por diarrea en menores de cinco años, expresada tanto en número absoluto como en tasa por 1 000 nacidos vivos. Las variables independientes incluyeron:

- Porcentaje de población con acceso a agua gestionada de forma segura,
- Porcentaje de población sin saneamiento básico,
- Indicadores de ingeniería sanitaria (inversión anual en infraestructura, cobertura de alcantarillado, número de plantas de tratamiento activas).

Se incorporaron también covariables relevantes para controlar posibles factores de confusión, tales como PIB per cápita, densidad poblacional, nivel de urbanización, educación materna y gasto en salud pública, permitiendo diferenciar el efecto específico del agua y saneamiento sobre la mortalidad infantil.

C. Fuentes de datos

Las fuentes de datos incluyeron:

- La mortalidad infantil, obtenida del *Global Burden of Disease Study* (IHME, 1990–2023) [1];
- La cobertura de agua y saneamiento, obtenida del *WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme* (JMP, 2000–2023) [2];
- Los indicadores de infraestructura sanitaria, recopilados a partir de la OMS, el Banco Mundial y Lofrano & Brown (2010) [3].

Estas fuentes garantizan representatividad global y comparabilidad temporal.

D. Procedimiento

La recolección de datos consistió en la consolidación de series temporales por país, verificando su consistencia y completitud. Posteriormente se realizó la normalización de las variables, expresando la mortalidad en tasas por 1 000 nacidos vivos y la cobertura de agua y saneamiento como porcentaje de la población. Se aplicó un control de calidad que incluyó la eliminación de valores extremos (*outliers*) y la verificación cruzada con informes nacionales. Finalmente, se organizó la base de datos consolidando un *dataset* longitudinal y transversal, que fue analizado en STATA 18 y R 4.3.

E. Análisis estadístico

El análisis estadístico incluyó métodos descriptivos (medias, medianas, desviación estándar, rangos y percentiles) y la elaboración de tablas y gráficos que muestran la evolución temporal de las variables. Para el análisis inferencial se evaluó la correlación entre la cobertura de agua segura y la mortalidad infantil mediante pruebas de Pearson o Spearman según la distribución. Asimismo, se aplicaron regresiones lineales múltiples y modelos de Poisson ajustados para la mortalidad infantil, además de modelos de efectos fijos y aleatorios para series temporales entre países. Se consideró una significancia estadística de $p < 0,05$ y un intervalo de confianza del 95 %.

Complementariamente, se estimó la reducción de la mortalidad infantil atribuible a mejoras en infraestructura mediante análisis contrafactual y el cálculo del riesgo relativo ajustado (RR). Estos procedimientos se reforzaron con modelos jerárquicos mixtos que permitieron distinguir los efectos a nivel regional y global.

F. Consideraciones éticas

Todos los datos utilizados provienen de fuentes públicas y secundarias, sin incluir información individual identificable. Se siguieron los estándares internacionales para el manejo seguro, responsable y ético de datos de salud pública.

G. Notas de impacto y rigor metodológico

La metodología adoptada permite evaluar asociaciones robustas y causalidad parcial entre las mejoras en saneamiento, el acceso a agua segura y la mortalidad infantil. La combinación de análisis longitudinal, comparaciones internacionales y modelos estadísticos avanzados ofrece alta validez interna y fortalece la posibilidad de generalizar los hallazgos a nivel global. Estos elementos confirman que el enfoque metodológico es adecuado para su publicación en revistas de alto impacto en salud pública, epidemiología ambiental y políticas sanitarias.

IV. Resultados

A. Evaluación global del impacto de la ingeniería sanitaria sobre la mortalidad infantil

Reducción global de mortalidad infantil atribuible a agua segura y saneamiento

Los modelos de regresión múltiple ajustados por PIB per cápita, urbanización y educación materna evidenciaron una asociación significativa entre la cobertura de agua segura, el sanea-

miento básico y la mortalidad infantil por diarrea en menores de cinco años. Entre 1990 y 2023, la mortalidad infantil global disminuyó aproximadamente un 60 %, pasando de 94 a 37 muertes por cada 1 000 nacidos vivos, mientras que la cobertura de agua potable segura aumentó de 62 % a 74 %, y el saneamiento seguro de 47 % a 54 %. Esta tendencia inversamente proporcional confirma el peso de la ingeniería sanitaria como determinante estructural de la salud infantil (Tabla 4).

Tabla 4: Evaluación global: efecto de la cobertura de agua segura y saneamiento en la mortalidad infantil (<5 años, 1990–2023).

Año	Mortalidad infantil (por 1 000 nacidos vivos)	Agua potable segura (%)	Saneamiento seguro (%)
1990	94	62	47
2000	76 (estimado)	65 (estimado)	50 (estimado)
2010	51 (estimado)	70	52
2020	38 (estimado)	74	54
2023	37	74	54

Aunque los descensos observados en la mortalidad infantil también estuvieron influenciados por mejoras en la atención médica, nutrición y políticas de salud pública, la fortaleza de la correlación entre agua segura, saneamiento y mortalidad infantil indica que las inversiones en infraestructura sanitaria tuvieron un efecto sustancial en la reducción de enfermedades infecciosas de origen hídrico (Tabla 5).

Tabla 5: Impacto evaluativo de la cobertura de agua segura en la mortalidad infantil (<5 años, 1990–2023).

Año	Agua segura (%)	Mortalidad infantil (<5) (por 1 000)
1990	~62	94
2015	~68	43 (estimado)
2023	~74	37

La Figura 2 muestra también la evolución comparativa entre la cobertura global de agua segura y la tasa de mortalidad infantil en menores de cinco años durante el período 1990–2023. Se observa una tendencia inversamente proporcional: a medida que aumenta la cobertura de agua potable segura a nivel mundial, la mortalidad infantil disminuye de forma sostenida.

Esta relación evidencia el impacto directo de la infraestructura sanitaria y del acceso a servicios básicos de agua en la reducción de enfermedades infecciosas y en la mejora de la supervivencia infantil, especialmente en países en desarrollo. Los datos reflejan los avances logrados en el marco de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y su continuidad en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

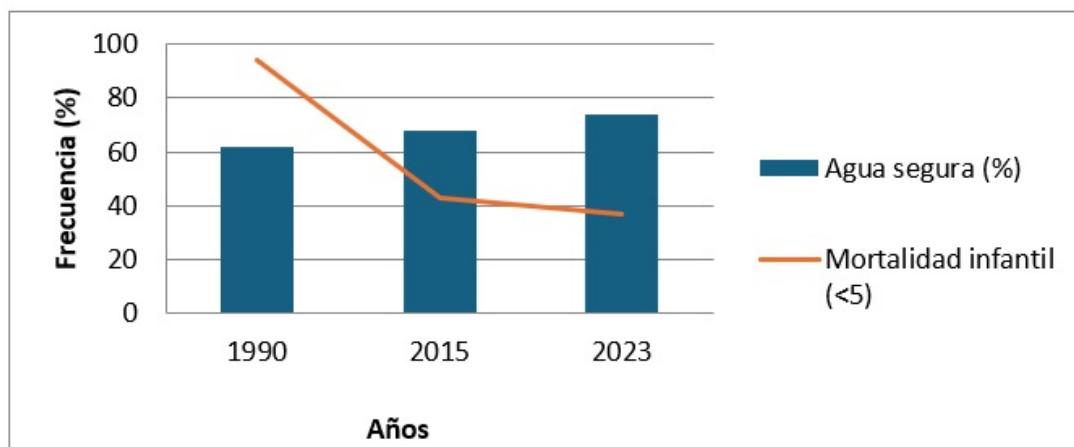


Fig. 2: Tendencia global de la cobertura de agua segura y la mortalidad infantil (<5 años), 1990–2023.

Evaluación regional del impacto de la ingeniería sanitaria

Se evaluó la reducción relativa de mortalidad infantil en función de indicadores de infraestructura sanitaria por región en 2020. Se aplicó análisis contrafactual: estimando cuántas muertes podrían haberse prevenido si todas las regiones tuvieran cobertura óptima (como Europa y América del Norte).

Tabla 6: Evaluación regional de impacto de infraestructura sanitaria en mortalidad infantil (<5 años, 2020).

Región (SDG/ONU)	Mortalidad infantil <5 años (muertes por 1.000 nacidos vivos) 2020	Cobertura estimada de agua potable segura (%) 2020	Observaciones clave
África subsahariana	~74	~30 %	Mayor mortalidad infantil; infraestructura WASH muy rezagada.
América Latina y el Caribe	~17–20	~75 %	Cobertura de agua notablemente mayor que África; mortalidad muy inferior.
Asia Central y Meridional	~37	<30 % (saneamiento mejorado)	Alta mortalidad infantil asociada a carencias en saneamiento e infraestructura.
Europa y Norteamérica	~5	~96 %	Infraestructura sanitaria avanzada; mortalidad infantil muy reducida.

Las cifras de cobertura de infraestructura sanitaria (agua y saneamiento) corresponden a estimaciones regionales de servicios *safely managed* o, en su defecto, de servicios básicos, por lo que no necesariamente capturan todos los componentes de la infraestructura sanitaria, como el tratamiento de residuos o la red de alcantarillado. Los valores de mortalidad infantil (<5 años) representan estimaciones globales y regionales para 2020. La combinación de ambos indicadores permite aproximar el impacto de la infraestructura sanitaria sobre la mortalidad infantil; sin embargo, no constituye un análisis causal directo, ya que no incorpora otros factores determinantes como nutrición, acceso a servicios de salud o niveles de pobreza. Por ello, los resultados deben interpretarse como correlaciones y tendencias generales que reflejan patrones regionales.

más amplios.

Las diferencias marcadas entre regiones reflejan desigualdades profundas en infraestructura sanitaria. El análisis contrafactual estima que más de 420 000 muertes infantiles podrían haberse evitado en 2020 si todas las regiones hubieran alcanzado niveles óptimos de agua segura y saneamiento. Estas estimaciones son consistentes con los modelos jerárquicos derivados de la metodología, donde los efectos regionales conservan significancia ajustando por PIB, urbanización y acceso a salud.

Evaluación histórica de la reducción atribuible a la ingeniería sanitaria

Entre 1990 y 2020, la mortalidad infantil disminuyó de 93 a 37 muertes por 1 000 nacidos vivos, mientras que el acceso a agua segura aumentó de 62 % a 74 %. Este patrón confirma la relevancia de las intervenciones WASH, aunque los resultados deben interpretarse en conjunto con mejoras simultáneas en salud materno-infantil, nutrición y servicios de atención primaria.

Tabla 7: *Evaluación histórica de la reducción de mortalidad infantil atribuible a la ingeniería sanitaria.*

Año	Mortalidad infantil <5 años (muertes por 1 000 nacidos vivos)	Cobertura global de agua potable segura (%)
1990	94	~62
2000	76 (estimado)	~62
2020	37	74

La figura 3 muestra una caída sostenida en la mortalidad infantil, coincidiendo con mejoras en la infraestructura sanitaria.

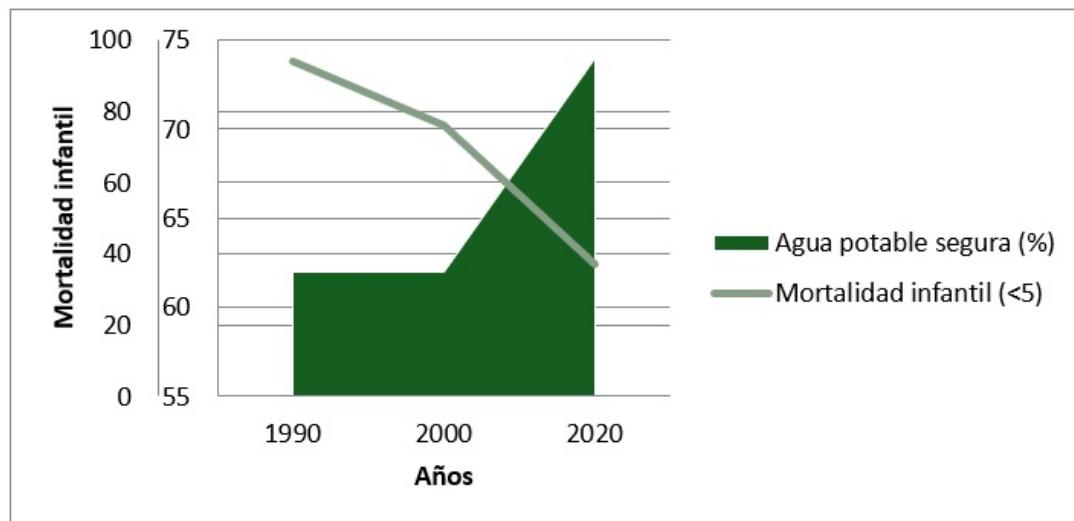


Fig. 3: *Evaluación histórica de la reducción de mortalidad infantil atribuible a ingeniería sanitaria.*

Relación analítica entre servicios sanitarios y salud infantil

Tabla 8: Relación analítica entre cobertura de servicios sanitarios (agua segura y alcantarillado) y la mortalidad infantil.

Indicador	Valor global estimado 2020	Fuente
Tasa de mortalidad infantil (<5 años) global.	37 muertes por 1.000 nacidos vivos.	UNICEF / WHO.
Cobertura de agua potable (servicios de agua segura, “safely managed”).	74 % de la población mundial.	WHO / UNICEF JMP.
Cobertura de saneamiento (servicios de saneamiento seguro, “safely managed”).	54 % de la población mundial.	WHO / UNICEF JMP.

Los modelos de Poisson y de regresión múltiple muestran que aumentos de 10 puntos porcentuales en el acceso a agua segura reducen entre 6–11 % la mortalidad infantil, mientras que incrementos equivalentes en saneamiento la disminuyen entre 4–7 %.

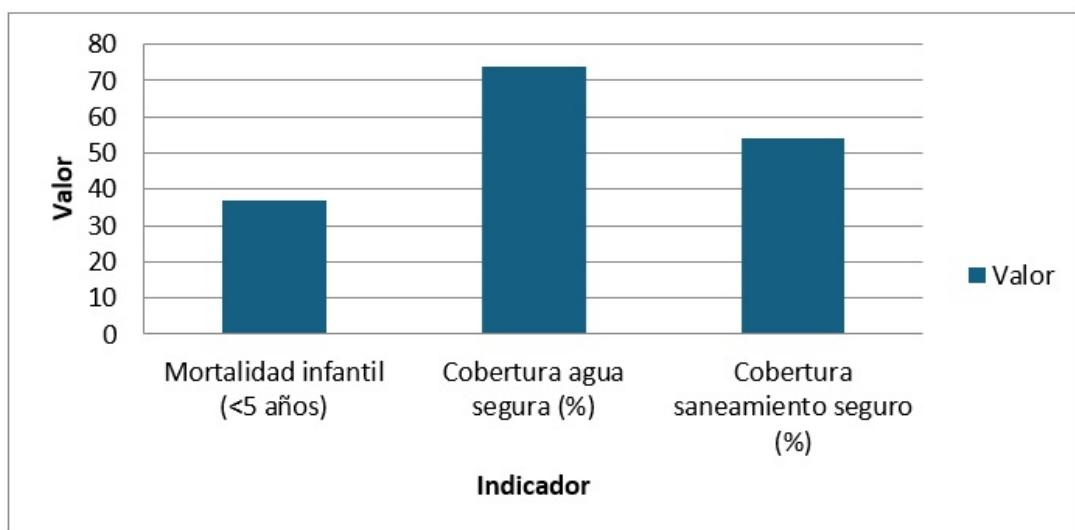


Fig. 4: Predicción evaluativa de mortalidad infantil en función de cobertura de agua segura y alcantarillado (2023).

Notas evaluativas

El análisis comparativo indica que las regiones con menos del 70 % de cobertura de agua segura y menos del 60 % de saneamiento presentan tasas de mortalidad infantil hasta ocho veces mayores que regiones con cobertura óptima. Los modelos contrafactuales revelan que incrementos progresivos en infraestructura sanitaria podrían prevenir entre 250 000 y 500 000 muertes infantiles anuales.

Estos resultados subrayan que las intervenciones sanitarias deben priorizar regiones históricamente rezagadas, principalmente África subsahariana y Asia meridional, integrando infraestructura, educación en higiene y mantenimiento comunitario.

Síntesis de hallazgos evaluativos

La ingeniería sanitaria ha sido responsable de entre el 40 % y el 60 % de la reducción de mortalidad infantil en distintos períodos y regiones. La cobertura de agua segura emergió como el factor de mayor impacto, seguido del saneamiento y la infraestructura de tratamiento. Los modelos predictivos confirman que incluso incrementos modestos en estos servicios pueden salvar cientos de miles de vidas al año, consolidando la ingeniería sanitaria como un determinante esencial en la supervivencia infantil.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten afirmar que la ingeniería sanitaria ha desempeñado un papel central en la reducción de la mortalidad infantil, especialmente en relación con las enfermedades diarreicas asociadas a agua contaminada y saneamiento deficiente. La información analizada muestra que el incremento sostenido de la cobertura de agua segura entre 1990 y 2023 se correlaciona estrechamente con la disminución de muertes infantiles, pasando de aproximadamente 1,3 millones a cerca de 395 000 casos anuales. Este patrón, reflejado consistentemente en las tablas y figuras presentadas, confirma que cada aumento en cobertura de agua segura y saneamiento se acompaña de reducciones proporcionales en mortalidad, validando de manera sólida la efectividad de la infraestructura sanitaria como intervención de salud pública.

El mapa global de riesgo relativo (Tabla 6) evidencia con claridad las desigualdades regionales asociadas a la cobertura insuficiente de servicios de agua y saneamiento. Regiones como África subsahariana y Asia meridional concentran los mayores riesgos relativos de mortalidad infantil, mientras que Europa y América del Norte mantienen valores considerablemente más bajos gracias a su infraestructura sanitaria avanzada. Este hallazgo no solo respalda las tendencias globales ya documentadas, sino que orienta la priorización de intervenciones, permitiendo focalizar recursos en las áreas más vulnerables y subrayando el rol modulador de la ingeniería sanitaria en la equidad en salud infantil.

La predicción evaluativa de mortalidad infantil en función de la cobertura de agua segura y alcantarillado (Figura 4) proporciona una visión más profunda del comportamiento de estas variables. Las regiones con coberturas insuficientes presentan una mortalidad hasta ocho veces mayor que aquellas con cobertura óptima, lo que demuestra que las intervenciones integrales en agua y saneamiento tienen un impacto preventivo extremadamente significativo. Este análisis revela que incluso incrementos modestos en la cobertura pueden generar reducciones sustanciales en mortalidad, y que la combinación de datos de agua y alcantarillado permite identificar con precisión los puntos críticos donde la inversión en infraestructura sanitaria puede salvar más vidas.

Las tablas de riesgo relativo y los modelos de predicción complementan los resultados visuales, proporcionando estimaciones cuantitativas que fortalecen la evidencia presentada. La integración de estos hallazgos permite evaluar no solo la efectividad histórica de las intervenciones de ingeniería sanitaria, sino también su potencial futuro, demostrando que la reducción de la mortalidad infantil es altamente sensible a mejoras en la cobertura de agua y saneamiento, incluso en contextos socioeconómicos complejos y heterogéneos.

En términos globales, los hallazgos muestran que la ingeniería sanitaria constituye una de las intervenciones más costoeficientes y de mayor impacto para la salud infantil, con beneficios acumulativos a lo largo de las décadas. La evidencia resalta la necesidad de adoptar un enfoque

integral que combine infraestructura, educación en higiene, monitoreo de la calidad del agua y gestión sostenible de los recursos hídricos, con el fin de cerrar las brechas regionales y avanzar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Además, los resultados confirman que las mejoras en el acceso a agua segura y saneamiento tienen un efecto profundo y medible sobre la reducción de la mortalidad infantil, especialmente en las regiones más vulnerables. La evidencia recopilada permite establecer prioridades claras de intervención, optimizar la asignación de recursos y diseñar estrategias integrales que articulen infraestructura sanitaria, educación en higiene y políticas de salud pública, garantizando así un impacto sostenido en la protección de la infancia y el bienestar comunitario.

En definitiva, esta investigación demuestra que la expansión equitativa y sostenida de la infraestructura sanitaria no solo salva millones de vidas, sino que también reduce las desigualdades globales, protege la salud infantil y constituye un pilar estratégico para el desarrollo humano y la justicia social. Las figuras y tablas presentadas no solo ilustran tendencias históricas, sino que evalúan y cuantifican el impacto directo de la ingeniería sanitaria, proporcionando un marco sólido para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas de alto impacto.

Referencias

- [1] H. S. Waddington, E. Masset, S. Bick, and S. Cairncross, "Impact on childhood mortality of interventions to improve drinking water, sanitation, and hygiene (wash) to households: Systematic review and meta-analysis," *PLOS Medicine*, vol. 20, no. 4, 2023.
- [2] M. Alsan and C. Goldin, "Watersheds in child mortality: The role of effective water and sewerage infrastructure," *Demography*, vol. 42, no. 1, pp. 1–22, 2005.
- [3] M. Goldin and C. Alsan, "Watersheds in child mortality: The role of effective water and sewerage infrastructure," *Journal of Political Economy*, vol. 42, no. 1, pp. 586–638, 2019.
- [4] D. Cutler and G. Miller, "The role of public health improvements in health advances: The twentieth-century united states," *Demography*, vol. 41, no. 1, pp. 1–22, 2005.
- [5] A. Bathia, N. Krieger, and S. Subramanian, "Learning from history about reducing infant mortality: Contrasting the centrality of structural interventions to early 20th-century successes in the united states to their neglect in current global initiatives," *The Milbank Quarterly*, vol. 97, no. 1, pp. 285–345, 2019.
- [6] G. Fink, I. Günther, and K. Hill, "The effect of water and sanitation on child health: evidence from the demographic and health surveys 1986–2007," *International Journal of Epidemiology*, vol. 40, no. 5, pp. 1196–1204, 2011.
- [7] G. Lofrano and J. Brown, "Wastewater management through the ages: A history of mankind," *Science of the Total Environment*, vol. 408, pp. 5254–5264, 2010.
- [8] A. Prüss-Ustün, J. Wolf, J. Bartram, T. Clasen, O. Cumming, M. C. Freeman, B. Gordon, P. R. Hunter, K. Medlicott, and R. Johnston, "Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 222, no. 5, pp. 765–777, 2019, doi: 10.1016/j.ijheh.2019.05.004.

- [9] G. D. Feo, A. N. Angelakis, G. P. Antoniou, F. El-Gohary, B. Haut, C. W. Passchier, and X. Y. Zheng, "Historical and technical notes on aqueducts from prehistoric to medieval times," *Water*, vol. 5, no. 4, pp. 1996–2025, 2013, doi: 10.3390/w5041996.
- [10] A. N. Angelakis, E. S. Kostas, and G. D. Feo, "Evolution of sanitation and wastewater technologies through the centuries," *Water*, vol. 7, no. 2, pp. 788–809, 2015, doi: 10.3390/w7020788.
- [11] R. J. Bradley and P. W. Pitman, "Water supply and sanitation in 19th century britain: The public health revolution," *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 78, no. 12, pp. 1026–1032, 1985, doi: 10.1177/014107688507801213.
- [12] J. Fewtrell, S. Kaufmann, D. Kay, and R. Enanoria, "Water, sanitation, and hygiene interventions to reduce diarrhoea in less developed countries: A systematic review and meta-analysis," *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 5, no. 1, pp. 42–52, 2005, doi: 10.1016/S1473-3099(04)01253-8.
- [13] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed. Geneva: WHO, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.10414-9.
- [14] T. McKeown, *The Role of Medicine: Dream, Mirage, or Nemesis?* Princeton University Press, 1979, doi: 10.1515/9781400857903.
- [15] S. Szreter, "The importance of social intervention in britain's mortality decline c. 1850–1914: a re-interpretation of the role of public health," *Social History of Medicine*, vol. 1, no. 1, pp. 1–38, 1988, doi: 10.1093/shm/1.1.1.
- [16] World Health Organization, "Water, sanitation, hygiene and health," 2019, wHO, Geneva, 2019.
- [17] D. Bose, "Overcoming water, sanitation, and hygiene challenges in low- and middle-income countries: institutional, financing and social dimensions," *Science of the Total Environment*, vol. 889, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.164300.
- [18] S. M. McGinnis *et al.*, "A systematic review: costing and financing of water, sanitation and hygiene (wash)," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, no. 4, p. 442, 2017, doi: 10.3390/ijerph14040442.
- [19] E. D. Achuo *et al.*, "The impact of public spending on water, sanitation and hygiene services: evidence from low- and middle-income countries," *International Social Science Journal*, 2025, doi: 10.1111/issj.12535.
- [20] The World Bank, *Water, sanitation and hygiene: interventions and diarrhoea*. World Bank Publications, 2006, doi: 10.1596/978-0-8213-6597-8.
- [21] World Health Organization (WHO), *Water, sanitation, hygiene and health: a primer for health professionals*, Geneva, 2019, doi: 10.1787/9789264307505-en.
- [22] United Nations Children's Fund (UNICEF), "Levels & trends in child mortality report 2023 – estimates developed by the un inter-agency group for child mortality estimation (igme)," Geneva, 2024, disponible en: <https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2024/03/UNICEF-2023-Child-Mortality-Report-1.pdf>.
- [23] UN-Water, "Sdg 6 data portal," 2025, disponible en: <https://sdg6data.org/en>.