

Potential Impact of Water, Sanitation and Hygiene Interventions on Childhood Diarrhea in Honduras Using Counterfactual Simulation

Marcio Madrid¹; Carlos Agudelo-Santos²; Laura Giacaman³; Melania Madrid⁴; Edil Argueta⁵

^{1,3} Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras, marcio.madrid@unah.edu.hn,
laura.giacaman@unah.edu.hn

² Centro de Diagnóstico de Imágenes Biomédicas, Investigación y Rehabilitación, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras, carlos.agudelo@unah.edu.hn

⁴ Facultad de Biología, Universidad de Salamanca, idu084453@usal.es

⁵ Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, México, edilarguetahn@gmail.com

Abstract— Acute diarrhea disease remains a major cause of morbidity and mortality in children under five years of age in Honduras and is closely related to water, sanitation and hygiene (WASH) conditions. To estimate the counterfactual causal effect of improvements in WASH on the prevalence of childhood diarrhea, a representative sample of 7,500 children adjusted to the distributions reported by ENDESA/MICS 2019 was simulated. Doubly robust estimators (IIPW) were used to estimate average causal effects, and five counterfactual intervention scenarios were analyzed, as well as heterogeneity by wealth quintile, area of residence, and age group. Simulated coverage of improved water was 88.1%, improved sanitation 76.3%, and basic hygiene 81.2%, with a prevalence of diarrhea of 4.1%. The estimated ATE showed decreases of -1.79 percentage points (pp) for improved water (95% CI: -3.63, 0.05), -1.93 pp for sanitation (95% CI: -3.72, -0.14) and -1.66 pp for hygiene (95% CI: -3.02, -0.30). The comprehensive WASH package was shown to have the greatest potential for reduction (0.74 pp), translating to 7.4 cases prevented per 1,000 children, with greater benefits in the poorest quintiles and in the 12–23 month group. Taken together, the findings indicate that integrated and targeted WASH interventions have the potential to significantly reduce the burden of childhood diarrhea in Honduras.

Keywords— childhood diarrhea, WASH, causal inference, AIPW, counterfactual simulation.

Impacto Potencial de Intervenciones de Agua, Saneamiento e Higiene Sobre Diarrea Infantil en Honduras Mediante Simulación Contrafactual

Marcio Madrid¹; Carlos Agudelo-Santos²; Laura Giacaman³; Melania Madrid⁴; Edil Argueta⁵

^{1,3} Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras, marcio.madrid@unah.edu.hn, laura.giacaman@unah.edu.hn

² Centro de Diagnóstico de Imágenes Biomédicas, Investigación y Rehabilitación, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras, carlos.agudelo@unah.edu.hn

⁴ Facultad de Biología, Universidad de Salamanca, idu084453@usal.es

⁵ Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, México, edilarguetahn@gmail.com

Resumen– La enfermedad diarreica aguda sigue siendo una importante causa de morbilidad y mortalidad en niños menores de cinco años en Honduras y está muy relacionada con las condiciones de agua, saneamiento e higiene (WASH). Para estimar el efecto causal contrafactual de mejoras en WASH sobre la prevalencia de diarrea infantil, se simuló una muestra representativa de 7.500 niños ajustada a las distribuciones informadas por ENDESA/MICS 2019. Se usaron estimadores doblemente robustos (AIPW) para estimar efectos causales promedio y se analizaron cinco escenarios contrafactuales de intervención, así como heterogeneidad por quintil de riqueza, área de residencia y grupo de edad. La cobertura simulada de agua mejorada fue 88.1%, saneamiento mejorado 76.3% e higiene básica 81.2%, con una prevalencia de diarrea de 4.1%. Los ATE estimados mostraron disminuciones de -1.79 puntos porcentuales (pp) para agua mejorada (IC95%: -3.63, 0.05), -1.93 pp para saneamiento (IC95%: -3.72, -0.14) y -1.66 pp para higiene (IC95%: -3.02, -0.30). El paquete integral WASH demostró tener el mayor potencial de reducción (0.74 pp), lo que se traduce en 7.4 casos prevenidos por cada 1,000 niños, con mayores beneficios en los quintiles más pobres y en el grupo de 12–23 meses. En conjunto, los hallazgos indican que las intervenciones WASH integradas y focalizadas tienen el potencial de reducir significativamente la carga de diarrea infantil en Honduras.

Palabras clave– diarrea infantil, WASH, inferencia causal, AIPW, simulación contrafactual.

I. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades diarreicas agudas (EDA) son la segunda causa de muerte en menores de cinco años en todo el mundo, con alrededor de 525,000 muertes anuales, concentrándose en países de bajos y medianos ingresos [1]. En Honduras, de acuerdo con la Encuesta Nacional de Demografía y Salud (ENDESA/MICS) 2019, el 13% de los niños menores de cinco años tuvo al menos un episodio de diarrea en las dos semanas anteriores a la encuesta [2]. Esta alta incidencia es un reflejo de las continuas deficiencias en las condiciones de agua, saneamiento e higiene (WASH, por sus siglas en inglés) que impactan a grandes porciones de la población hondureña.

El nexo entre las intervenciones WASH y la salud infantil está bien documentado. La transmisión fecal-oral de patógenos entéricos se produce a través de diversas vías, como

el consumo de agua contaminada, la exposición a heces humanas debido a un saneamiento deficiente y la contaminación de alimentos y superficies por prácticas antihigiénicas [3]. Revisiones sistemáticas recientes han verificado que las intervenciones de agua disminuyen el riesgo de diarrea entre un 17% y un 53%, según el tipo de intervención, y las mejoras en saneamiento y la promoción del lavado de manos con jabón reducen entre un 25% y un 45% [4], [5].

Pero hay una gran diferencia entre las asociaciones observacionales que se informan en la literatura y la estimación de efectos causales para informar las políticas de salud pública. Los estudios transversales, si bien son útiles para describir la magnitud del problema, están expuestos a sesgos por variables no medidas que covarian con el acceso a servicios WASH y el riesgo de diarrea, tales como factores socioeconómicos, educativos y de comportamiento [6]. Esta restricción metodológica impide una estimación precisa del efecto esperado de ciertas intervenciones.

Los métodos de inferencia causal han avanzado considerablemente en las últimas décadas, dando lugar a herramientas estadísticas capaces de aproximar efectos causales a partir de datos observacionales bajo supuestos explícitos [7]. Entre ellos, los estimadores doblemente robustos, como el AIPW y el TMLE, tienen la ventaja de ser consistentes si al menos uno de los modelos especificados (exposición o desenlace) es correcto, y pueden usar algoritmos de aprendizaje automático para disminuir el riesgo de mala especificación [8], [9].

El razonamiento contrafactual apoya la inferencia causal al preguntar: ¿cuál sería la prevalencia de diarrea si todos los niños tuvieran acceso a agua mejorada? Esta capacidad es relevante para la planificación de políticas, porque permite anticipar los efectos de distintas medidas antes de aplicarlas [10].

Este estudio busca: 1) estimar los efectos causales promedio de las intervenciones WASH (agua mejorada, saneamiento mejorado, higiene básica) sobre la diarrea infantil en Honduras; 2) simular escenarios contrafactuales de intervención, como la universalización y las estrategias focalizadas; 3) examinar la heterogeneidad de los efectos

según características socioeconómicas, demográficas y geográficas; y 4) verificar la robustez de los resultados ante una posible confusión no medida. Para ello, se usan datos simulados calibrados a los datos informados en ENDESA/MICS 2019, empleando inferencia causal con estimadores doblemente robustos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Fuente de Datos y Población de Estudio

Este estudio utilizó una simulación de datos representativa de la población de menores de cinco años en Honduras, calibrada según las distribuciones y prevalencias reportadas en la Encuesta Nacional de Demografía y Salud / Encuesta de Indicadores Múltiples por Conglomerados (ENDESA/MICS) 2019 [2]. La misma fue llevada a cabo por el Instituto Nacional de Estadística (INE) de Honduras con apoyo técnico de UNICEF y la Secretaría de Salud, siguiendo la metodología estandarizada del programa global MICS. La encuesta original incluyó más de 20,000 hogares en los 18 departamentos del país.

La simulación generó datos para 7,500 niños menores de 60 meses, manteniendo las distribuciones reportadas para variables clave: 45% de residencia rural, distribución de quintiles de riqueza con mayor concentración en estratos bajos, y prevalencias de cobertura WASH consistentes con los indicadores nacionales. Se incluyeron únicamente niños vivos con información completa sobre variables de exposición y desenlace. El uso de datos simulados se justifica por la necesidad de controlar el proceso generador de datos para validar los estimadores causales empleados y por consideraciones de disponibilidad de microdatos.

B. Definición del Desenlace

El desenlace primario fue la ocurrencia de diarrea en las dos semanas previas a la entrevista, definida según el estándar MICS/DHS como tres o más deposiciones líquidas o semilíquidas en un período de 24 horas, reportada por la madre o cuidadora principal. Esta definición es consistente con la utilizada en encuestas poblacionales a nivel global y permite comparabilidad internacional [11].

Como desenlaces secundarios se consideraron: diarrea severa (definida como episodio con deshidratación moderada a severa o necesidad de hospitalización) y búsqueda de atención en establecimiento de salud. El modelo generador de datos se ancló inicialmente a la prevalencia nacional de diarrea de dos semanas reportada en ENDESA/MICS 2019 (13%); sin embargo, tras aplicar conjuntamente las distribuciones marginales simuladas de la cobertura WASH, la estructura socioeconómica y las dependencias de covariables, la muestra analítica final arrojó una prevalencia inicial menor del 4,1%. Por ello, tratamos el 4,1% como la línea base efectiva basada en modelos para la estimación causal y la simulación contrafactual, mientras que mantenemos el 13% como

referencia nacional externa para la evaluación de calibración e interpretación de políticas [2].

C. Definición de Exposiciones WASH

Las exposiciones de interés fueron definidas siguiendo la escalera de servicios del Programa Conjunto de Monitoreo (JMP) de OMS/UNICEF para los Objetivos de Desarrollo Sostenible [12]:

1) *Agua mejorada*: Fuente de agua para beber que, por su diseño y construcción, tiene el potencial de proveer agua segura, incluyendo: agua entubada, pozos perforados o protegidos, manantiales protegidos, agua de lluvia recolectada, y agua embotellada o en bolsa. Se codificó como variable binaria (1=mejorada, 0=no mejorada).

2) *Saneamiento mejorado*: Instalación sanitaria diseñada para separar higiénicamente las excretas del contacto humano, incluyendo: inodoro con descarga a alcantarillado o tanque séptico, letrina de pozo mejorada ventilada, letrina con losa, e inodoro de compostaje. No incluye instalaciones compartidas con otros hogares.

3) *Higiene básica*: Disponibilidad de instalación de lavado de manos en el hogar con presencia de agua y jabón (o detergente) en el momento de la observación directa.

Adicionalmente, se construyó un indicador de WASH completo que requiere cumplimiento simultáneo de los tres componentes, representando el nivel óptimo de servicios.

D. Covariables y Estructura Causal

La selección de covariables se basó en un grafo acíclico dirigido (DAG) que representa las relaciones causales asumidas entre variables. Se identificaron como confusores potenciales aquellas variables que afectan tanto la probabilidad de exposición WASH como el riesgo de diarrea:

Variables del niño: edad en meses (continua, 0-59), sexo (binaria), lactancia materna actual (binaria). Variables del hogar: quintil de riqueza (ordinal, 1-5), área de residencia (rural/urbana), región de salud (categórica, 6 regiones), hacinamiento (personas por dormitorio, continua), tipo de piso (tierra vs. otros materiales). Variables maternas: años de educación (continua, 0-16).

El supuesto de no confusión condicional (ignorabilidad) establece que, dado el conjunto de covariables medidas, la asignación del tratamiento es independiente de los resultados potenciales. Este supuesto no es verificable empíricamente, por lo que se realizaron análisis de sensibilidad para evaluar su plausibilidad.

E. Estrategia de Inferencia Causal

Se empleó el estimador Augmented Inverse Probability Weighting (AIPW) como método primario de estimación [13]. AIPW es un estimador doblemente robusto que combina la ponderación por probabilidad inversa con un modelo de regresión del desenlace, proporcionando estimaciones consistentes si al menos uno de los dos modelos está correctamente especificado.

El procedimiento de estimación siguió tres pasos: primero, se estimaron los “propensity scores” (PS) mediante regresión logística, modelando la probabilidad de exposición WASH condicionada a las covariables. Segundo, se ajustaron modelos de desenlace separados para expuestos y no expuestos. Tercero, se combinaron ambos componentes en el estimador AIPW (1):

$$\psi_{\text{AIPW}} = n^{-1} \sum_i [\hat{\mu}_i(W_i) + A_i(Y_i - \hat{\mu}_i(W_i))/\hat{e}(W_i)] - n^{-1} \sum_i [\hat{\mu}_0(W_i) + (1-A_i)(Y_i - \hat{\mu}_0(W_i))/(1-\hat{e}(W_i))] \quad (1)$$

donde $\hat{\mu}_i$ y $\hat{\mu}_0$ son las predicciones de los modelos de desenlace para tratados y no tratados, $\hat{e}$ es el PS estimado, A es el indicador de tratamiento, Y es el desenlace, y W representa las covariables.

La varianza del estimador se calculó utilizando la función de influencia, y los intervalos de confianza al 95% se construyeron bajo normalidad asintótica. El riesgo relativo (RR) se calculó como la razón de las probabilidades predichas bajo tratamiento y no tratamiento.

F. Escenarios Contrafactuales

Se simularon cinco escenarios de intervención que representan diferentes estrategias de política pública:

1) *Escenario 1 - Universalizar agua mejorada*: Asume que toda la población menor de cinco años accede a fuentes de agua mejorada (cobertura 100%).

2) *Escenario 2 - Universalizar saneamiento mejorado*: Asume acceso universal a instalaciones de saneamiento mejorado no compartido.

3) *Escenario 3 - Universalizar agua y saneamiento*: Combinación de los escenarios 1 y 2.

4) *Escenario 4 - Paquete WASH completo*: Universalización de agua, saneamiento e higiene básica simultáneamente.

5) *Escenario 5 - Intervención focalizada*: Incremento de 20 puntos porcentuales en la cobertura de agua mejorada únicamente en los quintiles de riqueza más bajos (quintiles 1 y 2).

Para cada escenario, se calculó la prevalencia esperada de diarrea bajo la intervención, la reducción absoluta y relativa respecto al escenario observado, y el número de casos potencialmente evitados por cada 1,000 niños.

Se incluyó un escenario adicional de traducción de referencia para facilitar la interpretación de políticas bajo la prevalencia nacional de diarrea ENDESA/MICS 2019 (13%). Este escenario no reestima el modelo causal; más bien, reescala las reducciones relativas observadas en la simulación principal a una prevalencia de referencia del 13%, proporcionando así una aproximación de referencia nacional de los casos potencialmente evitados por cada 1,000 niños.

G. Análisis de Heterogeneidad

Se estimaron efectos causales condicionales promedio (CATE, Conditional Average Treatment Effect) para

identificar subgrupos con mayor beneficio potencial. Los modificadores de efecto evaluados fueron: quintil de riqueza, área de residencia (urbano/rural), y grupo de edad (0-5, 6-11, 12-23, 24-59 meses). Los CATE se calcularon como la diferencia en prevalencia de diarrea entre expuestos y no expuestos dentro de cada estrato.

H. Análisis de Sensibilidad

Se realizaron los siguientes análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los hallazgos:

1) *Diagnóstico de positividad*: Se evaluó el solapamiento (overlap) de las distribuciones de propensity scores entre tratados y no tratados. Valores extremos de PS (cerca de 0 o 1) indican violaciones del supuesto de positividad que pueden generar estimaciones inestables.

2) *E-values*: Se calcularon E-values para cuantificar la fortaleza mínima de asociación que un confusor no medido debería tener tanto con el tratamiento como con el desenlace para explicar completamente la asociación observada [14]. Un E-value alto indica mayor robustez ante confusión no medida.

I. Consideraciones Éticas

Este estudio utilizó datos simulados basados en parámetros publicados de ENDESA/MICS 2019, sin acceso a microdatos individuales identificables. La encuesta original contó con aprobación ética del Comité de Ética de Investigación de Honduras y obtuvo consentimiento informado de todos los participantes. El código de análisis está disponible para reproducibilidad.

J. Software Estadístico

Todos los análisis se realizaron en Python 3.11 utilizando las librerías NumPy, Pandas, SciPy y Matplotlib [15]-[18]. Los estimadores AIPW fueron implementados siguiendo las especificaciones metodológicas de Funk et al. [13] y Glynn y Quinn [19].

III. RESULTADOS

Todas las reducciones absolutas y los casos prevenidos por cada 1,000 niños reportados en el análisis principal se refieren a la prevalencia simulada efectiva de la línea basal del 4,1%. La prevalencia nacional ENDESA/MICS 2019 del 13% se utiliza como referencia externa y en el manuscrito revisado, se presenta por separado de la línea base analítica basada en modelos para evitar confundir los objetivos de calibración con los resultados simulados finales.

A. Características de la Población de Estudio

La muestra simulada incluyó 7,500 niños menores de cinco años. El 44.6% residía en área rural. La distribución por quintil de riqueza mostró mayor concentración en los estratos más bajos, consistente con el perfil socioeconómico hondureño. La edad media fue de 29.4 meses y el 51% fueron varones. La Tabla I presenta las características descriptivas de la población.

La cobertura de servicios WASH fue: agua mejorada 88.1%, saneamiento mejorado 76.3%, e higiene básica 81.2%. Solo el 60.0% de los niños contaba con los tres componentes WASH simultáneamente. Se observaron marcadas inequidades según quintil de riqueza: la cobertura de agua mejorada varió desde 72.3% en el quintil más pobre hasta 98.1% en el más rico, mientras que para saneamiento la brecha fue aún mayor (48.9% vs 96.2%).

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO (N=7,500)

Variable	n (%)
Área de residencia - Rural	3,345 (44.6%)
Sexo masculino	3,825 (51.0%)
Cobertura agua mejorada	6,608 (88.1%)
Cobertura saneamiento mejorado	5,723 (76.3%)
Cobertura higiene básica	6,090 (81.2%)
Cobertura WASH completo	4,500 (60.0%)
Prevalencia de diarrea	308 (4.1%)

Nota: Referencia nacional observada en ENDESA/MICS 2019: 13%; Línea base simulada efectiva en el conjunto de datos analítico final: 4,1%.

B. Prevalencia de Diarrea Según Exposiciones WASH

La prevalencia global de diarrea fue 4.1%. Se observaron diferencias marcadas según la exposición WASH. Entre los niños con acceso a agua mejorada, la prevalencia fue 3.7%, comparada con 7.4% en aquellos sin acceso (RR crudo = 0.50). Patrones similares se observaron para saneamiento (3.4% vs 6.6%; RR = 0.51) e higiene básica (3.4% vs 7.1%; RR = 0.49). Los niños con WASH completo presentaron la menor prevalencia (2.6%), significativamente inferior a quienes carecían de algún componente (6.4%; RR = 0.42).

La Fig. 1 muestra la distribución de cobertura WASH por quintil de riqueza, evidenciando el gradiente socioeconómico.

C. Efectos Causales Estimados (AIPW)

Los efectos causales promedio-estimados mediante AIPW se presentan en la Tabla II y Fig. 2. El agua mejorada mostró un efecto protector con una reducción de 1.79 puntos porcentuales en la prevalencia de diarrea (IC95%: -3.63, 0.05; RR = 0.69). El saneamiento mejorado produjo una reducción de 1.93 pp (IC95%: -3.72, -0.14; RR = 0.67), estadísticamente significativa al nivel del 5%. La higiene básica redujo la prevalencia en 1.66 pp (IC95%: -3.02, -0.30; RR = 0.69).

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO (N=7,500)

Intervención	ATE (pp)	IC 95%	RR	E-value
Agua mejorada	-1.79	(-3.63, 0.05)	0.69	2.28
Saneamiento mejorado	-1.93	(-3.72, -0.14)*	0.67	2.35
Higiene básica	-1.66	(-3.02, -0.30)*	0.69	2.25

ATE: Efecto promedio del tratamiento; pp: puntos porcentuales; RR: riesgo relativo; * p<0.05

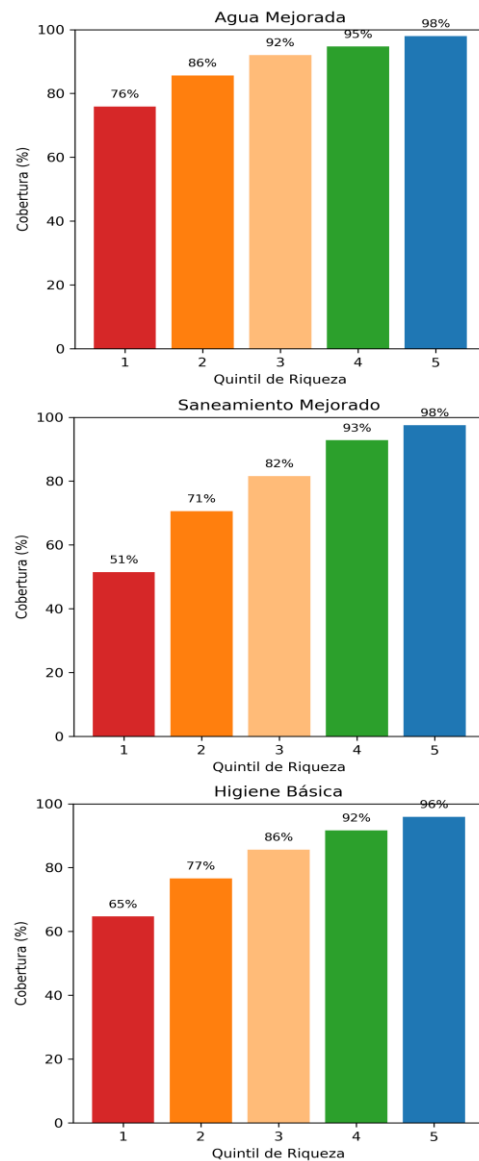


Fig. 1 Cobertura de agua mejorada, saneamiento mejorado e higiene básica a lo largo de los quintiles de riqueza en la muestra simulada.

D. Escenarios Contrafactuales

La Tabla III y Fig. 3 presentan los resultados de la simulación contrafactual. El escenario de universalización de agua mejorada (Escenario 1) mostró un impacto modesto dado que la cobertura basal ya es alta (88.1%). El saneamiento mejorado universal (Escenario 2) tendría mayor impacto relativo. La combinación de agua y saneamiento (Escenario 3) podría reducir la prevalencia en 0.48 pp, evitando aproximadamente 4.8 casos por cada 1,000 niños.

El escenario de paquete WASH completo (Escenario 4) mostró el mayor potencial de reducción: 0.74 pp, equivalente a una reducción relativa del 17.9% y 7.4 casos evitados por 1,000 niños. La estrategia focalizada en quintiles bajos (Escenario 5) tuvo un impacto más limitado a nivel poblacional.

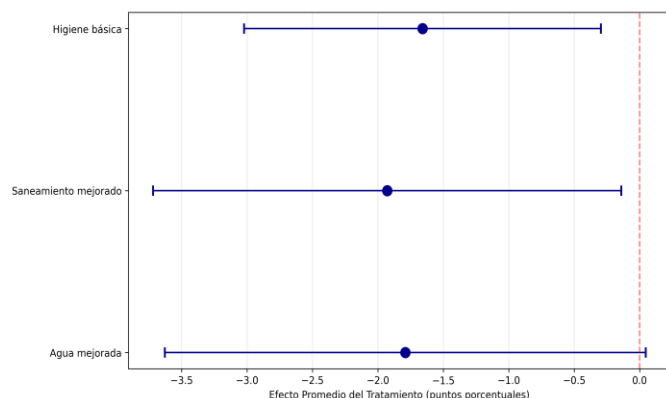


Fig. 2 Forest plot de efectos causales estimados (AIPW) con intervalos de confianza al 95%.

TABLA III
IMPACTO ESTIMADO DE ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN WASH

Escenario	Prev. CF	Red. Abs.	Red. Rel.	Casos / 1000
Agua universal	4.1%	0.02 pp	0.5%	0.2
Saneamiento universal	4.0%	0.17 pp	4.1%	1.7
Agua + Saneamiento	3.7%	0.48 pp	11.5%	4.8
Paquete WASH completo	3.4%	0.74 pp	17.9%	7.4
Focalizado (Q1-Q2)	4.2%	-0.03 pp	-0.8%	-0.3

ATE: Efecto promedio del tratamiento; pp: puntos porcentuales; RR: riesgo relativo; * $p < 0.05$; Los principales resultados contrafactuales se expresan en relación con la prevalencia simulada efectiva de la línea basal del 4,1%.

Cuando las reducciones relativas de la simulación principal se trasladaron a la prevalencia nacional de diarrea ENDESA/MICS 2019 del 13%, el impacto absoluto proyectado aumentó. Según esta traducción de referencia, el agua mejorada universal correspondió a una reducción absoluta de aproximadamente 0.07 puntos porcentuales (0.7 casos por cada 1,000 niños), el saneamiento universal mejorado a 0.53 puntos porcentuales (5.3 casos por cada 1,000), el agua combinada y saneamiento a 1.50 puntos porcentuales (15.0 casos por cada 1,000) y el paquete completo de WASH a 2.33 puntos porcentuales (23.3 casos por cada 1,000). El escenario objetivo del quintil bajo se mantuvo mínimo en aproximadamente -0.10 puntos porcentuales (-1.0 casos por cada 1,000). Estos valores deben interpretarse como traducciones de referencia en lugar de efectos primarios reestimados.

E. Heterogeneidad de Efectos

El análisis de efectos condicionales reveló heterogeneidad sustancial. Por quintil de riqueza, los mayores efectos del agua mejorada se observaron en el quintil 2 (CATE = 3.68 pp) y quintil 1 (CATE = 2.66 pp), mientras que en quintiles más altos el efecto fue menor.

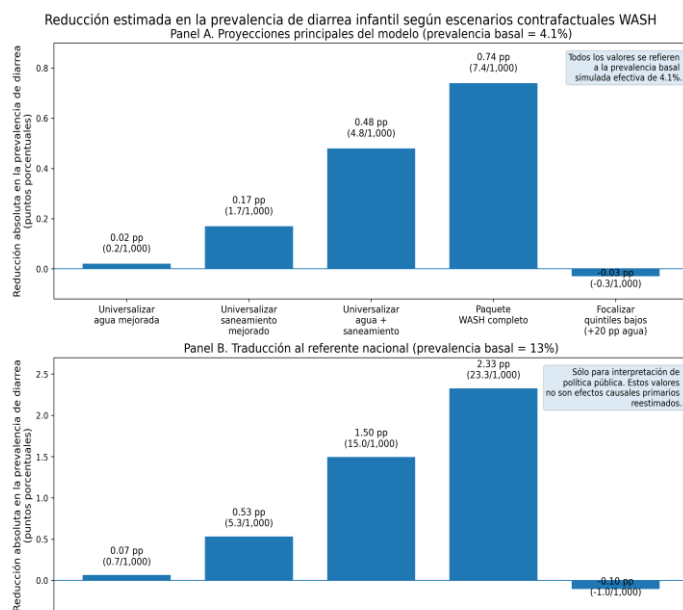


Fig. 3 Reducción estimada de la prevalencia de diarrea infantil en escenarios de intervención contrafactual con WASH. El Panel A muestra las principales proyecciones basadas en modelos derivadas de la prevalencia simulada efectiva de la línea basal del 4,1%. El Panel B traslada las reducciones relativas observadas a la prevalencia inicial nacional ENDESA/MICS 2019 del 13% solo para la interpretación de políticas; Estos valores no representan efectos causales primarios reestimados.

Por área de residencia, el efecto fue mayor en áreas urbanas (CATE = 4.90 pp) que en rurales (CATE = 2.25 pp), aunque esta diferencia puede reflejar características diferenciales de las poblaciones sin acceso. Por grupo de edad, el mayor beneficio se observó en niños de 12-23 meses (CATE = 5.07 pp), coincidiendo con el período de mayor vulnerabilidad a infecciones entéricas debido a la introducción de alimentación complementaria y mayor movilidad. El grupo de 6-11 meses mostró un efecto paradójicamente reducido, posiblemente relacionado con el efecto protector de la lactancia materna exclusiva en este período (Ver Fig. 4).

F. Diagnósticos y Análisis de Sensibilidad

El diagnóstico de positividad mostró adecuado solapamiento de los PS para las tres exposiciones WASH, con distribuciones superpuestas entre tratados y no tratados (Fig. 5). No se identificaron violaciones severas del supuesto de positividad, aunque algunos valores extremos de PS fueron observados para saneamiento, particularmente en el quintil más alto.

Los E-valores calculados oscilaron entre 2.25 y 2.35 para los efectos puntuales, indicando que un confusor no medido necesitaría asociaciones de al menos 2.3 veces tanto con la exposición como con el desenlace para explicar completamente los efectos observados.

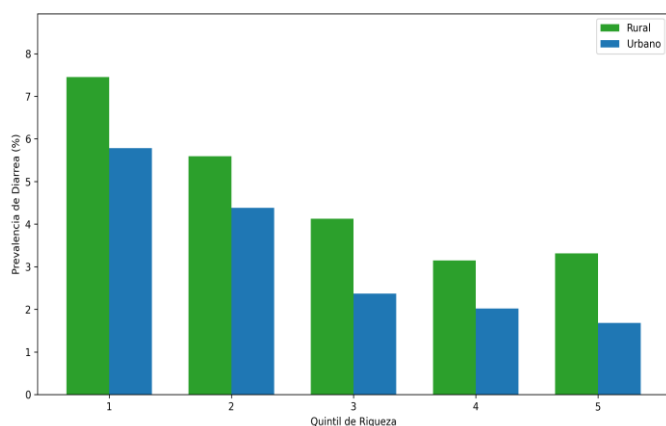


Fig. 4 Prevalencia de diarrea por área de residencia y quintil de riqueza.

Estas magnitudes de asociación son plausibles en el contexto de determinantes socioeconómicos de salud, sugiriendo que los hallazgos son moderadamente robustos, pero no inmunes a confusión residual.

III. DISCUSIÓN

Este estudio estimó mediante simulación contrafactual el impacto potencial de intervenciones de agua, saneamiento e higiene sobre la diarrea infantil en Honduras, utilizando parámetros calibrados según ENDESA/MICS 2019. Los hallazgos principales indican que las intervenciones WASH tienen efectos protectores moderados, pero clínicamente relevantes, que los beneficios son heterogéneos según características socioeconómicas y demográficas, y que las estrategias integradas que combinan múltiples componentes maximizan el impacto.

A. Interpretación de los Efectos Causales

Los efectos estimados mediante AIPW son consistentes con la literatura internacional. El meta-análisis más reciente de Wolf et al. [4] reportó riesgos relativos de 0.55 (IC95%: 0.40, 0.75) para tratamiento de agua en punto de uso, 0.77 (IC95%: 0.66, 0.91) para fuentes mejoradas en premisas, y 0.75 (IC95%: 0.60, 0.95) para saneamiento con conexión a alcantarillado. Nuestras estimaciones de RR entre 0.67 y 0.69 se encuentran dentro de estos rangos, proporcionando validez externa a los hallazgos.

La magnitud de los efectos absolutos (1.7-1.9 puntos porcentuales de reducción) puede parecer modesta, pero debe contextualizarse. Primero, existe una discrepancia con implicaciones directas para la interpretación. Dado que las reducciones absolutas de riesgo y los casos prevenidos por cada 1,000 dependen de la prevalencia de resultados iniciales, los valores derivados del 4.1% simulado deben interpretarse como proyecciones internas basadas en modelos y no como estimaciones nacionales directas de impacto. En términos prácticos, la dirección y el orden relativo de los escenarios de intervención son más estables que el número absoluto de casos evitados, que probablemente será mayor si la verdadera línea

base poblacional se acerca al 13% reportado en ENDESA/MICS 2019. Segundo, incluso reducciones pequeñas en prevalencia, cuando se aplican a nivel poblacional, pueden traducirse en números sustanciales de casos evitados: el escenario de WASH completo podría prevenir aproximadamente 7,400 episodios de diarrea por cada millón de niños menores de cinco años.

B. Implicaciones para Políticas de Salud Pública

Los resultados tienen varias implicaciones programáticas. Primero, respaldan la implementación de paquetes WASH integrados por sobre intervenciones aisladas. El efecto sinérgico observado (17.9% de reducción con WASH completo vs. efectos individuales menores) sugiere que abordar simultáneamente agua, saneamiento e higiene maximiza los beneficios, consistente con el marco conceptual de las rutas de transmisión fecal-oral [3].

Segundo, la heterogeneidad de efectos justifica estrategias de focalización. Los mayores beneficios en quintiles bajos y en el grupo de 12-23 meses sugieren que priorizar hogares en pobreza con niños pequeños optimizaría el impacto. Sin embargo, la estrategia focalizada simulada (Escenario 5) mostró efectos poblacionales limitados, indicando que la universalización sigue siendo necesaria para lograr reducciones sustanciales.

Tercero, los hallazgos informan la asignación de recursos. La cobertura de agua mejorada ya es alta en Honduras (88%), mientras que saneamiento presenta mayor brecha (76%). Cerrar esta brecha, particularmente en áreas rurales y quintiles bajos, podría tener mayor rendimiento marginal que inversiones adicionales en agua.

C. Fortalezas Metodológicas

Este estudio presenta varias fortalezas. El uso de estimadores doblemente robustos (AIPW) proporciona protección contra especificación incorrecta de modelos, una ventaja sobre métodos tradicionales de regresión [8], [13]. La simulación contrafactual permite proyectar escenarios de política que serían éticamente imposibles de evaluar experimentalmente. El análisis de heterogeneidad identifica subgrupos prioritarios para intervención. Y el cálculo de E-values cuantifica la vulnerabilidad de los hallazgos a confusión no medida, mejorando la transparencia de la interpretación causal [14].

D. Limitaciones

El estudio tiene limitaciones importantes que deben considerarse. Primero, utiliza datos simulados en lugar de microdatos originales, donde los hallazgos dependen de los supuestos del modelo generador. Aunque la calibración se basó en estadísticas publicadas de ENDESA/MICS 2019, las relaciones entre variables son asumidas y pueden diferir de la realidad. Esto se refleja en la discrepancia entre la prevalencia simulada (4.1%) y la reportada (13%).

Este desajuste también limita la traducción política de los escenarios contrafactuales. Específicamente, las estimaciones

expresadas como casos prevenidos por cada 1,000 niños se atenúan mecánicamente por la menor prevalencia simulada de la línea inicial y, por tanto, no deben interpretarse como reducciones directas de la carga nacional sin recalibrar la prevalencia observada en la encuesta.

Segundo, la definición de diarrea es autorreportada por la madre o cuidadora, sujeta a sesgo de recuerdo y variabilidad en la interpretación de síntomas [11]. Tercero, la medición de exposiciones WASH en encuestas transversales captura un momento puntual que puede no reflejar la exposición histórica acumulada del niño. Cuarto, a pesar del ajuste por múltiples confusores, la confusión residual por variables no medidas (ej., prácticas de alimentación, calidad del agua, condiciones de almacenamiento) no puede descartarse, como lo indican los E-values moderados.

Quinto, el análisis no incorpora el diseño muestral complejo de la encuesta original (estratificación, conglomerados, ponderación), que puede afectar la precisión de las estimaciones. Finalmente, la estacionalidad de la diarrea, conocida por su variación con patrones de lluvia [16], no pudo ser modelada adecuadamente con datos transversales.

E. Direcciones Futuras

Varias líneas de investigación podrían fortalecer estos hallazgos. El acceso a microdatos de ENDESA/MICS permitiría análisis con el diseño muestral apropiado y explorar interacciones más complejas. La vinculación con datos climáticos y de infraestructura habilitaría modelos espacio-temporales que capturen variación estacional y geográfica [20]. Estudios longitudinales o cuasi-experimentales de intervenciones WASH en Honduras proporcionarían validación externa de las estimaciones. Y la integración de métodos de aprendizaje automático (Super Learner) en los estimadores AIPW/TMLE podría mejorar la especificación de modelos [21].

V. CONCLUSIÓN

Las intervenciones de agua, saneamiento e higiene tienen el potencial de reducir significativamente la enfermedad diarreica en niños menores de cinco años en Honduras. Los beneficios protectores estimados mediante métodos de inferencia causal son consistentes con la evidencia internacional y justifican la priorización de la inversión en Salud y Seguridad en el Trabajo (WASH) como una intervención de salud pública. La implementación de paquetes integrados que aborden simultáneamente los tres elementos maximizaría el impacto, enfocándose en poblaciones vulnerables en los dos quintiles más bajos de riqueza y en niños de 12 a 24 meses. Estos hallazgos contribuyen con evidencia empírica para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible 3 (salud) y 6 (agua y saneamiento) en Honduras.

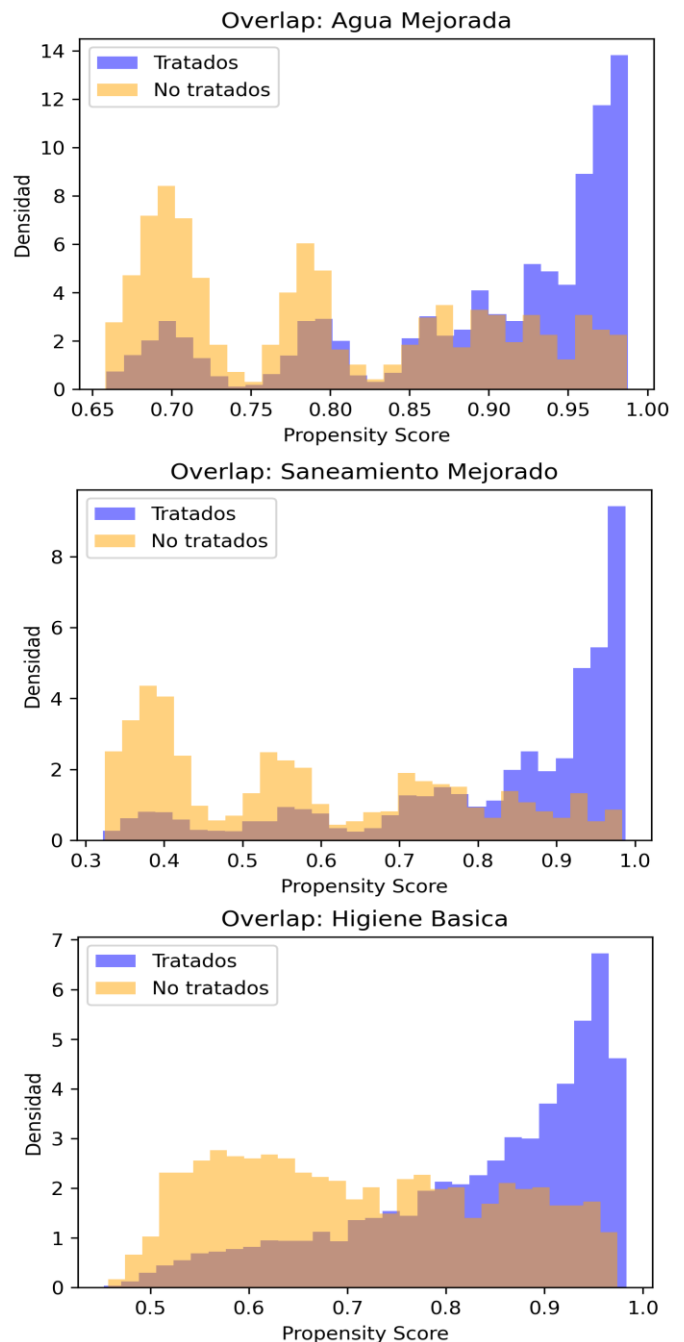


Fig. 5 Las puntuaciones de propensión se solapan con los diagnósticos de mejora del agua, saneamiento y higiene básica, mostrando la distribución entre niños tratados y no tratados. Panel principal basado en la prevalencia simulada del inicio = 4,1%.

La simulación contrafactual con métodos doblemente robustos proporciona estimaciones más confiables que las asociaciones observacionales tradicionales, pero persisten limitaciones relacionadas con la confusión residual y la naturaleza de los datos replicados. Las futuras investigaciones, utilizando datos a nivel micro y diseños longitudinales, fortalecerán la capacidad de informar políticas basadas en

evidencia para reducir las desigualdades en la salud infantil en Honduras.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo recibido del Instituto de Investigación en Ciencias Médicas y Derecho a la Salud (ICIMEDES) de la Facultad de Ciencias Médicas (FCM) y la Dirección de Investigaciones Científicas, Humanísticas y Tecnológicas (DICIHT) todas ellas de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH). Los autores agradecen al profesor Isaac Zablah por su experta orientación metodológica y técnica, en múltiples aspectos de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] C. Troeger et al., "Estimates of the global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of diarrhoea in 195 countries: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016", *Lancet Infect. Dis.*, vol. 18, no. 11, pp. 1211-1228, 2018. doi: 10.1016/S1473-3099(18)30362-1
- [2] Instituto Nacional de Estadística de Honduras, "Encuesta Nacional de Demografía y Salud / Encuesta de Indicadores Múltiples por Conglomerados (ENDESA/MICS) 2019", *INE*, 2021. Disponible en: <https://ine.gob.hn/endesa/>
- [3] J. H. Humphrey, "Child undernutrition, tropical enteropathy, toilets, and handwashing", *Lancet*, vol. 374, no. 9694, pp. 1032-1035, 2009. doi: 10.1016/S0140-6736(09)60950-8
- [4] J. Wolf et al., "Effectiveness of interventions to improve drinking water, sanitation, and handwashing with soap on risk of diarrhoeal disease in children in low-income and middle-income settings: a systematic review and meta-analysis", *Lancet*, vol. 400, no. 10345, pp. 48-59, 2022. doi: 10.1016/S0140-6736(22)00937-0
- [5] A. J. Pickering et al., "Water, sanitation and hygiene interventions for acute childhood diarrhea: a systematic review to provide estimates for the Lives Saved Tool", *BMC Public Health*, vol. 17, no. Suppl 4, p. 776, 2017. doi: 10.1186/s12889-017-4746-1
- [6] L. Clasen et al., "Interventions to improve water quality for preventing diarrhoea", *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 10, p. CD004794, 2015. doi: 10.1002/14651858.CD004794.pub3
- [7] M. A. Hernán and J. M. Robins, *Causal Inference: What If*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2020.
- [8] M. J. van der Laan and S. Rose, *Targeted Learning: Causal Inference for Observational and Experimental Data*. New York: Springer, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-9782-1
- [9] M. J. Smith, R. V. Phillips, M. A. Luque-Fernandez, and C. Maringe, "Application of targeted maximum likelihood estimation in public health and epidemiological studies: a systematic review", *Ann. Epidemiol.*, vol. 86, pp. 34-48.e28, 2023. doi: 10.1016/j.annepidem.2023.06.004.
- [10] S. R. Cole and M. A. Hernán, "Constructing inverse probability weights for marginal structural models", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 168, no. 6, pp. 656-664, 2008. doi: 10.1093/aje/kwn164
- [11] T. F. Clasen et al., "Estimating the impact of unsafe water, sanitation and hygiene on the global burden of disease: evolving and alternative methods", *Trop. Med. Int. Health*, vol. 19, no. 8, pp. 884-893, 2014. doi: 10.1111/tmi.12330
- [12] WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene, Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2024: Special focus on inequalities", *World Health Organization*, 2025. [Online]. Available: <https://data.unicef.org/resources/jmp-report-2025/>
- [13] M. J. Funk et al., "Doubly robust estimation of causal effects", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 173, no. 7, pp. 761-767, 2011. doi: 10.1093/aje/kwq439
- [14] T. J. VanderWeele and P. Ding, "Sensitivity analysis in observational research: introducing the E-value", *Ann. Intern. Med.*, vol. 167, no. 4, pp. 268-274, 2017. doi: 10.7326/M16-2607
- [15] Python Software Foundation, "Python 3.11 documentation", [Online]. Available: <https://docs.python.org/3.11/>
- [16] W. McKinney, "Data structures for statistical computing in Python", in *Proc. 9th Python in Science Conf. (SciPy)*, 2010, pp. 56-61, doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a
- [17] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine learning in Python", *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, pp. 2825-2830, 2011
- [18] S. M. Lundberg and S.-I. Lee, "A unified approach to interpreting model predictions", in *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NeurIPS 2017)*, 2017, pp. 4765-4774
- [19] A. N. Glynn and K. M. Quinn, "An introduction to the augmented inverse propensity weighted estimator," *Polit. Anal.*, vol. 18, no. 1, pp. 36-56, 2010, doi: 10.1093/pan/mpp036
- [20] S. Hubbard, J. Wolf, H. H. Oza, B. F. Arnold, M. C. Freeman, and K. Levy, "Differential effectiveness of water, sanitation, and handwashing interventions to reduce child diarrhea in dry and rainy seasons: A systematic review and meta-analysis of intervention trials," *Environ. Health Perspect.*, vol. 133, no. 2, Art. no. 026001, 2025, doi: 10.1289/EHP14502
- [21] C. Moccia, G. Moirano, M. Popovic, C. Pizzi, P. Fariselli, L. Richiardi, C. T. Ekström, and M. Maule, "Machine learning in causal inference for epidemiology," *Eur. J. Epidemiol.*, vol. 39, no. 10, pp. 1097-1108, 2024, doi: 10.1007/s10654-024-01173-x